



**João Pedro do Amaral
Oliveira**

**Avaliação de riscos para o Complexo Químico de
Estarreja.**



Universidade de Aveiro Departamento de Ambiente e Ordenamento
Ano 2008

**João Pedro do Amaral
Oliveira**

**Avaliação de riscos para o Complexo Químico de
Estarreja.**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor Carlos Borrego, Professor Catedrático do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho em memória de Sara Maria Ricarte do
Amaral Oliveira, minha Mãe.

o júri

presidente

Prof. Dra. Ana Isabel Couto Neto da Silva Miranda

Professora associada do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Carlos Alberto Diogo Soares Borrego

Professor catedrático do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Luís Miguel Moura Neves de Castro

Professor Adjunto do Instituto Superior Engenharia de Coimbra

agradecimentos

Os meus agradecimentos iniciais são dedicados ao meu orientador e mentor, Professor Doutor Carlos Borrego, pela orientação, supervisão e paciência; ao Doutorando Richard Tavares pela compreensão e paciência quase inesgotáveis e por fim ao Professor Doutor Fernando Almeida pela ajuda em SIG, disponibilidade e boa disposição.

Ao casal mais simpático, compreensivo e hospitaleiro, principalmente nestes últimos meses, José e Piedade Santos.

Aos fantásticos amigos que sempre me acompanharam nos melhores e nos piores momentos, e que contribuíram para o meu desenvolvimento enquanto ser Humano.

À minha companheira, Liliana Ferreira Santos pela compreensão, apoio, motivação e genialidade.

Ao meu Pai e meus Irmãos por serem os meus pilares fundamentais.

palavras-chave

Acidente industrial grave, análise de risco, dispersão atmosférica, gases pesados, Fosgénio e exposição

Resumo

O presente trabalho surge no sentido da crescente problemática de acidentes industriais graves e suas consequências para as populações e ambiente. É apresentada a evolução da legislação em estabelecimentos industriais, bem como o enquadramento histórico dos acidentes graves mais conhecidos, sendo descritos vários métodos de análise e abordagem de risco associados às referidas actividades em vários países.

É feita uma descrição acerca da dispersão e comportamento de uma nuvem gás pesado na atmosfera.

De seguida, apresenta-se a ferramenta de análise de risco, o software RISCAV, desenvolvido no Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro. Como caso de estudo definiu-se uma libertação instantânea com origem numa ruptura catastrófica de um depósito de armazenamento de Fosgénio no Complexo Químico de Estarreja ao qual se aplicou o software RISCAV.

Seguidamente fez-se a análise qualitativa e quantitativa da dispersão da nuvem de Fosgénio e concentrações obtidas através do RISCAV para as diferentes classes de estabilidade onde posteriormente é avaliada a exposição da população para o pior cenário possível, tendo sido tiradas conclusões relevantes.

keywords

Major industrial accident, risk analysis, atmospheric dispersion, heavy gases, exposure, Phosgene and hazardous substances.

abstract

The present work was based on the Industrial accidents scenarios and their repercussion to the population and environment. With this purpose is presented: the legislation follow-up, the historical industrial accidents scenarios, the methods and the approaches to several risk analysis.

It is also made a description of the behavior and dispersion of heavy gas cloud in the atmosphere.

Furthermore, will be presented RISCAV, risk analysis software, developed by Environmental Department of Aveiro's University. This tool was applied to the case of study, an instant release from a catastrophic collapse of a Phosgene storage tank in Estarreja Chemical Complex, and the analysis of the dispersion of Phosgene cloud, is subsequently assessed to predict the exposure of the population. Finally conclusions are made about the results.

Índice Geral

Índice Geral	i
Índice de Figuras	iv
Índice de Tabelas	vi
Lista de Abreviaturas	vii
1. Introdução e metodologia.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objectivos	4
1.3 Metodologia.....	5
2 Análise histórica de Acidentes Industriais Graves	7
2.1 Flixborough	7
2.2 Seveso	8
2.3 Bhopal.....	9
2.4 Basileia.....	10
2.5 Toulouse	10
3 Análise de Risco	15
3.1 Métodos de análise de risco para identificação de perigo.....	15
3.1.1 Checklist.....	15
3.1.2 HAZOP [Hazard and Operability Analysis] – Estudo dos Perigos e da Operacionalidade	16
3.1.3 FMEA [Failure modes and effect analysis] – Análise dos modos de falha e dos seus efeitos	17
3.1.4 MCAA [<i>Maximum credible accident analysis</i>] – Análise de Cenários de Acidente mais Credíveis.....	19
3.2 Análise da frequência de ocorrência de acidentes.....	19
3.2.1 FTA [<i>Fault Tree Analysis</i>] - Análise de Árvore de Falhas	19
3.2.2 ETA [<i>Event Tree Analysis</i>] - Análise de Árvore de Eventos	20
3.3 Alguns projectos internacionais	21
3.3.1 Projecto BEMHA.....	21
3.3.2 ASSURANCE	21
3.3.3 ARAMIS – [<i>Accidental Risk Assessment Methodology for Industries</i>]	22
3.4 Análise de risco na América Norte e na Europa	23

3.4.1	América do Norte	23
3.4.1.1	Estados Unidos da América	23
3.4.1.2	Canadá.....	24
3.4.2	Europa	25
3.4.2.1	Holanda.....	25
3.4.2.2	França.....	26
3.5	Análise de risco em Portugal, caso particular - Aveiro	27
3.5.1	SECUR-RIA	27
3.5.2	PACOPAR	28
4	Dispersão atmosférica de gases pesados	31
4.1	Formação da nuvem	32
4.2	Comportamento de uma nuvem de gases pesados	32
4.2.1	Libertações instantâneas	34
4.2.2	Libertações contínuas	35
4.2.3	Influência do terreno	36
4.3	Tipos de simulação	37
4.3.1	Modelação numérica.....	37
4.3.2	Modelação Física.....	39
4.4	Modelo RISCAV.....	39
4.4.1	Descrição sumária do RISCAV	40
4.4.2	Dados e entrada	40
4.4.3	Base de dados Meteorológicos	40
4.4.4	Base de dados de tipos de acidentes.....	40
4.4.5	Software de simulação	41
4.4.5.1	Emissão – Modelo de Emissão	42
4.4.5.2	Dispersão atmosférica.....	43
4.4.5.3	Efeitos	45
4.4.6	Descrição do funcionamento do RISCAV.....	47
4.4.7	Validação do modelo RISCAV por comparação com resultados experimentais à escala real	48
4.4.8	Avaliação do desempenho do sistema RISCAV.....	53
5	Caso de Estudo	55
5.1	Caracterização concelho de Estarreja.....	55
5.1.1	Parâmetros meteorológicos	57
5.2	Caracterização do CQE	59

5.3	Análise de Risco.....	61
5.3.1	Localização de pontos sensíveis	64
6	Aplicação do sistema RISCÁV ao caso de estudo	67
6.1	Cenários de acidente.....	67
6.1.1	Condições de Armazenamento dos compostos químicos Cloro e Fosgénio	68
6.1.2	Condições meteorológicas para ambas as simulações Cloro e Fosgénio para as diferentes classes de estabilidade	69
6.2	Análise qualitativa das simulações	70
6.2.1	Simulação da evolução da nuvem de Fosgénio para classe de estabilidade A aos 5, 10 e 30 minutos.....	72
6.2.2	Simulação da evolução da nuvem de Fosgénio para classe de estabilidade D aos 5, 10 e 30 minutos após a libertação e simulação de Cloro para 30 minutos após a libertação.....	75
6.2.3	Simulação de Cloro passados 30 minutos após a libertação:	80
6.2.4	Simulação da evolução da nuvem de Fosgénio para classe de estabilidade F aos 5, 10 e 30 minutos após a libertação.....	81
6.3	Análise quantitativa da evolução das concentrações máximas e índices de risco a que a população está exposta	84
6.4	Determinação dos índices de risco para as pessoas expostas.....	89
7	Conclusões e considerações finais	91
	Bibliografia.....	94
	Sites de internet consultados:	98

Índice de Figuras

Figura 2.1 Imagem do acidente de Flixborough. (fonte: URL 1).....	7
Figura 2.2 Imagem do impacto do acidente em Seveso. (URL 3).....	9
Figura 2.3 Imagem do impacto do acidente de Bhopal. (URL 4).....	10
Figura 2.4 Imagem do impacto do acidente em Toulouse. (URL 6)	11
Figura 3.1 Esquema triangular dos stakeholders envolvidos na segurança. (fonte: (LACOURSIERE, 2005))	25
Figura 4.1 a) Representação esquemática de uma nuvem de uma libertação instantânea num modelo de caixa; b) Representação esquemática da evolução de uma nuvem de libertação instantânea.	34
Figura 4.2 a) Representação esquemática de uma nuvem de uma libertação contínua num modelo de caixa; b) Representação esquemática da evolução de uma nuvem de libertação contínua.	35
4.3 Representação utilizada nos modelos de caixa sobre a forma cilíndrica da nuvem de gás pesado durante a fase gravítica e relação entre a altura e o diâmetro da nuvem. (fonte: TNO, 2005, pp.374).....	43
Figura 4.4 Esquema de funcionamento do software RISCAV.....	47
Figura 4.5 Gráfico comparativo da evolução temporal para o período de simulação das concentrações máximas de Gás Natural estimadas pelo RISCAV e registadas no ensaio experimental BURRO 2.....	49
Figura 4.6 Gráfico comparativo da evolução temporal para o período compreendido entre 300 e 500 segundos após o início da libertação das concentrações máximas de Gás Natural estimadas pelo RISCAV e registadas no ensaio experimental BURRO 2.	50
Figura 4.7 Gráfico comparativo da evolução temporal para o período de simulação das concentrações máximas de Gás Natural estimadas pelo RISCAV e registadas no ensaio experimental BURRO 9.....	51
Figura 4.8 Gráfico comparativo da evolução temporal para o período compreendido entre 300 e 500 segundos após o início da libertação das concentrações máximas de Gás Natural estimadas pelo RISCAV e registadas no ensaio experimental BURRO 9.	52
Figura 5.1 Mapa do distrito de Aveiro destacando concelho de Estarreja dividido por freguesias. (URL 9)	56

Figura 5.2 Rosa-dos-ventos de Estarreja aos 10 m, para os dados horários referentes a 2005	57
Figura 5.3 Frequência de Classes de estabilidade atmosférica em Estarreja	58
Figura 5.4 – As principais indústrias presentes no Complexo Químico de Estarreja (URL 10)	61
Figura 5.5 Localização de pontos sensíveis escolas, hospital, unidade de saúde, Mercado e Recinto de feiras (URL 10)	65
Figura 6.1 Simulação RISCAV para Classe de estabilidade A 5 minutos após o acidente.	72
Figura 6.2 Simulação RISCAV para Classe de estabilidade A 10 minutos após o acidente.	73
Figura 6.3 Simulação RISCAV para Classe de estabilidade A 30 minutos após o acidente.	74
Figura 6.4 Simulação da nuvem de Fosgénio para 5 minutos após a libertação	75
Figura 6.5 Simulação da nuvem de Fosgénio após 10 minutos da libertação.	76
Figura 6.6 Simulação da nuvem de Fosgénio após 30 minutos da libertação.	79
Figura 6.7 Simulação da nuvem de Cloro, após 30 minutos da libertação.	80
Figura 6.8 Simulação RISCAV para Classe de estabilidade F 5 minutos após o acidente	81
Figura 6.9 Simulação RISCAV para Classe de estabilidade F, 10 minutos após o acidente.....	82
Figura 6.10 Simulação RISCAV para Classe de estabilidade F 30 minutos após o acidente.....	83
Figura 6.11 Evolução das concentrações para a classe de estabilidade A variando a temperatura ambiente.....	85
Figura 6.12 Evolução das concentrações para a classe de estabilidade D variando a temperatura ambiente.....	86
Figura 6.13 Evolução das concentrações para a classe de estabilidade F variando a temperatura ambiente.....	87
Figura 6.14 Evolução das concentrações para as diferentes classes de estabilidade para o Verão.....	88

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 Factores que mais contribuem para acidentes graves em instalações fixas (KHAN e ABASSI, 1999).	12
Tabela 4.1 Correspondência de cada tipo de modelo.....	42
Tabela 4.2 Parâmetros estatísticos calculados para os ensaios modelados pelo RISCAV para BURRO 2 e BURRO 9	54
Tabela 5.1 Distribuição da população do concelho de Estarreja por freguesia (URL 9)...	56
Tabela 5.2 Estabilidade atmosférica em função da intensidade do vento.....	58
Tabela 5.3 Dados meteorológicos pela AMRia (ERASE, 2000).....	58
Tabela 5.4 Principais produtos perigosos existentes no Complexo Químico de Estarreja (URL 9)	63
Tabela 5.5 Distância dos diferentes pontos críticos à fonte	66
Tabela 5.6 Correspondência entre indicadores no mapa a escolas do concelho de Estarreja.....	66
Tabela 6.1 Condições de armazenamento do Cloro e Fosgénio.	69
6.2 Condições meteorológicas escolhidas para a definição do pior caso possível.....	69
Tabela 6.3 Limites de concentração representados para o Fosgénio	71
Tabela 6.4 Limites de concentração representados para o Cloro	71
Tabela 6.5 Número de pessoas expostas por local e por concentração	78
Tabela 6.6 Concentrações máximas para as diferentes classes de estabilidade e velocidades do vento.....	84
Tabela 6.7 Número de alunos distribuídos por escola no conselho de Estarreja e índices de concentração a que expostos.....	89

Lista de Abreviaturas

AIG – Acidente industrial Grave

ARAMIS – “*Accidental Risk Assessment Methodology for Industries in the Context of the Seveso II Directive*”

ASSURANCE – “*ASSEssment of the Uncertainties in Risk ANalysis of Chemical Establishments*”

BEMHA – “*Benchmark Exercise on Major Hazards Analysis*”

CFD – Computacionais da dinâmica de fluidos

CQE – Complexo Químico de Estarreja;

ERPG – “*Emergency Planning Guideline Level*”

EPA – “*Environment Protection Agency*”

ETA – “*Event Tree Analysis*”

FMEA – “*Failure modes and effect analysis*”

FTA – “*Fault Tree Analysis*”

HAZOP – “*Hazard and Operability Analysis*”

MCAA – “*Maximum credible accident analysis*”

PACOPAR – Painel consultivo comunitário do programa actuação responsável;

SECUR-RIA –

STEL – “*Short Term Exposure Level*”

TWA – “*Time Weighted Average*”

1. Introdução e metodologia

1.1 Enquadramento

O forte desenvolvimento industrial observado no último século e o consequente aumento do transporte de produtos tóxicos e inflamáveis, têm sido identificados como actividades de risco potencial. A ocorrência de acidentes industriais graves (AIG), como Flixbourough, Seveso, Bhopal e Toulouse, deram ênfase à crescente preocupação e percepção a estas actividades e incutiram a necessidade de estudar e avaliar o risco da exposição humana.

Desde a década de 70 que começaram a ser legisladas actividades industriais, em relação aos perigos que estas reapresentavam, sendo essencialmente as actividades de armazenamento e fabrico de material pirotécnico os abrangidos. Foi nos anos 80, que foram redigidos documentos legais com o intuito de legislar este tipo de actividades a nível Europeu. O primeiro foi publicado em 1982 através da Directiva 82/501/CEE, transposta para direito nacional pelo Decreto de Lei 224/87 de 3 de Junho, também conhecida como a Directiva Seveso, nome escolhido em virtude do acidente ocorrido nesta cidade. Posteriormente foi alterada pelas Directivas 87/216/CEE e 88/610/CEE transpostas para direito nacional pelo Decreto de Lei 204/93.

Com o crescente interesse sobre esta temática, acompanhado de um maior conhecimento científico e maior preocupação com a saúde humana e ambiente, a Directiva 82/501/CEE foi revogada, o que levou a criação da Directiva 96/82/CE (Seveso II). Nesta Directiva constam noções acerca dos efeitos no exterior (*Off - site*) dos estabelecimentos (art. 3º e 4º), *“os estabelecimentos de distâncias adequadas entre os estabelecimentos abrangidos pelo presente diploma e zonas residenciais, as zonas de utilização pública e zonas ambientalmente sensíveis”* (art. 4º), e de efeito “dominó” (art. 15º). Em 2001, esta Directiva foi transposta para direito interno pelo DL 164/2001, de 23 de Maio, reflectindo assim a experiência adquirida pela aplicação da directiva Seveso I ao longo de uma década. A ocorrência de novos acidentes, a evolução tecnológica e o aumento da preocupação da protecção do Homem, revelou a necessidade de rever o documento original. Nesta revisão, o âmbito de aplicação é alargado e inclui novas exigências que incidem nos sistemas de gestão de segurança, nos Planos de Emergência, no ordenamento de território, no reforço das inspecções e na informação ao público. É aplicável a todos os estabelecimentos onde se encontrem

ou se produzem substâncias perigosas em quantidades iguais ou superiores às indicadas no Decreto de Lei 164/2001, 23 de Maio, em dois níveis 1 e 2. As empresas nível 1, abrangidas pelos artigos 11º e 14º são apenas obrigadas a uma Política de Prevenção de Acidentes Graves (PPAG). As de nível 2, abrangidas pelo artigo 16º, são obrigadas a elaborar um relatório de segurança demonstrando que é posta em prática a PPAG e um sistema de segurança, assim como a elaboração de um Plano de Emergência Interno (PEI) e fornecendo informação para a elaboração de um Plano de Emergência Externo (PEE) (DL 164/2001).

A ocorrência de alguns acidentes industriais graves envolvendo substâncias como, artigos pirotécnicos e adubos, em indústrias não abrangidas pela Directiva Seveso II, levou à publicação da Directiva 2003/105/CE, transposta pelo Decreto de Lei 254/2007 de 12 de Julho, que passa a regulamentar actividades que até então não estavam abrangidas, e inclui também uma extensa lista de produtos carcinogéneos. Consta também neste diploma todos os deveres do “operador”, operador este que está responsável pela execução de um Sistema de Gestão de Segurança para a Prevenção de Acidentes Graves bem como pela elaboração da Política de Prevenção de Acidentes Graves, sendo que estes são obrigados a serem revistos e sujeitos a inspecções periódicas (DL 254/2007).

A produção, armazenamento e transporte de materiais perigosos são processos vitais para qualquer sociedade tecnologicamente avançada e complexa. Apesar da produção e distribuição de materiais perigosos estar associada ao desenvolvimento económico, existe um perigo potencial a nível social e ambiental, em caso de libertação accidental de produtos químicos perniciosos para o ambiente. Neste sentido houve uma crescente necessidade de desenvolver técnicas de melhoria da gestão de decisão dos riscos que envolvem materiais perigosos (KHAN e ABBASI, 2001)

O elevado número de acidentes graves que teve lugar em complexos industriais químicos nos últimos anos originou sérias preocupações sobre a fiabilidade, segurança, e possíveis impactos ambientais destas actividades industriais. Este facto propiciou o desenvolvimento de ferramentas de avaliação da segurança e de gestão de riscos. O manuseamento de substâncias químicas pode originar riscos directos, devido às suas características, contudo a formação de reacções imprevistas (reacções “pirata”) normalmente associadas a uma perda de conteúdo para o exterior, e

formação de outros produtos tóxicos, são difíceis de prever. A formação de substâncias perigosas, resultante do desvio do processo produtivo, a partir das condições normais de funcionamento, foi considerada a causa de alguns AIG's, sendo um dos mais importantes, o acidente ocorrido em Seveso (1976) em território europeu, que deu o nome as directivas europeias sobre o controlo dos grandes riscos industriais. (BARONTINI *et al.*, 2008)

Nos últimos anos, o esforço tem sido realizado no sentido de alertar as populações sobre os perigos decorrentes da urbanização na proximidade de zonas de industriais. Acidentes como Bhopal na Índia (1984), na cidade do México (1988), e mais recentemente em Toulouse (2001), têm demonstrado claramente que as consequências de AIG's podem ser severamente agravadas pela proximidade das instalações fabris de zonas densamente povoadas. (COZZANI, *et al.*, 2006)

No final do século XX, acidentes tecnológicos como Enschede (2000), e já no início do novo século em Toulouse (2001), Lagos (2002) e Bélgica (2004), levaram o público a questionar tanto as indústrias como as autoridades de regulação, acerca das decisões tomadas em relação ao risco. As comunidades querem agora ser informadas e requerem processos de decisão mais transparentes. As decisões baseadas em riscos, necessitam de análises fiáveis fundamentadas numa base científica, quando o analista detecta uma situação de risco, essa análise irá sofrer alterações até ser confrontada com a realidade do local, por isso é necessário desenvolver uma metodologia consistente dando orientações para seleccionar cenários de acidente possíveis, tendo em conta a gestão de segurança e a eficácia de resposta. No contexto da Directiva Seveso II, existe também subjacente a necessidade de um método que gere consenso entre os especialistas risco em toda a Europa. (SALVI e DEBRAY, 2006)

A presente dissertação está dividida em sete capítulos, no primeiro é apresentado um breve enquadramento do tema da dissertação e no segundo capítulo é apresentado um enquadramento histórico de AIG's mais conhecidos, bem como a análise das consequências dos mesmos.

No terceiro capítulo estão descritas algumas das ferramentas e métodos de análise de risco, bem como projectos de investigação internacionais para a análise de risco.

O tema da dispersão atmosférica é abordado no quarto capítulo, sendo feita também a apresentação e descrição da ferramenta de análise de risco RISCAV.

O caso de estudo é apresentado no quinto capítulo, descrevendo-se também o concelho de Estarreja, onde se identificou os locais críticos do concelho na exposição a dois compostos químicos libertados acidentalmente no Complexo Químico de Estarreja.

A análise das simulações obtidas através do programa RISCAV tendo em conta a exposição, para as diferentes condições atmosféricas, esta presente no sexto capítulo.

Por fim no sétimo capítulo é onde são retiradas as conclusões acerca dos resultados obtidos.

1.2 Objectivos

A presente dissertação tem como principais objectivos a caracterização de vários elementos de risco tecnológico, centrando-se essencialmente no estudo da exposição da população a compostos químicos perigosos, manuseados e/ou armazenados no Complexo Químico de Estarreja (CQE). Para tal, foi utilizada uma ferramenta numérica desenvolvida no DAO, o sistema RISCAV. Esta ferramenta consiste num programa computacional que permite simular a dispersão de gases pesados. Recorreu-se também aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (ArcGIS) com o objectivo de referenciar os locais críticos, onde o potencial de ocorrência de danos é considerado elevado.

Em suma, os principais objectivos da dissertação são os seguintes:

- Descrição breve da evolução da legislação europeia face aos acidentes industriais graves;
- Estado da arte da análise de risco;
- Utilização de uma ferramenta de apoio à tomada de decisão em caso de emergência para a área em questão;
- Avaliação de risco atendendo ao factor exposição aos compostos químicos mais perigosos no CQE;

Elaboração de medidas correctivas ao ordenamento do território tendo em conta as simulações feitas.

1.3 Metodologia

A metodologia deste trabalho incidiu, numa primeira fase, numa pesquisa bibliográfica exhaustiva e revisão da literatura. Prosseguiu-se então com a revisão do estado da arte na área da análise de risco, a identificação dos mecanismos de dispersão de gases pesados e a caracterização dos parâmetros meteorológicos para Estarreja.

A pesquisa efectuada das ferramentas disponíveis, para apoio na análise de risco e sua aplicação a um caso real de uma ferramenta, sendo a ferramenta utilizada, o RISCAV.

2 Análise histórica de Acidentes Industriais Graves

O estudo de acidentes ocorridos é sem duvida um dos passos importantes na evolução da análise de risco e de sistemas de segurança. Foi no século XX em que ocorreram os maiores acidentes industriais mais graves, sendo que a maior parte destes tenha ocorrido em países fortemente industrializados, mas também em países em vias de desenvolvimento. Os acidentes como Flixborough no Reino Unido (1974), Seveso em Itália (1976), Bhopal na Índia (1984), Basileia (1986) na Suíça (1986) e mais recentemente Toulouse em França (2001) vieram influenciar a forma de encarar toda a problemática dos AIG's e análise de risco.

2.1 Flixborough

Por volta das 16:53 no primeiro sábado de Junho de 1974, a fábrica de companhia *Works of Nypro, Ltd* (UK) foi atingida por uma explosão de proporções bélicas. 26 dos 64 trabalhadores que operavam dentro dos limites da fábrica perderam a vida e os restantes sofreram ferimentos graves. Esta explosão se tivesse ocorrido num dia de semana, as consequências teriam sido muito piores. Os danos no exterior da fábrica espalharam-se e causaram ferimentos graves a 53 pessoas, e centenas delas foram atingidas com ferimentos ligeiros. Os danos materiais espalharam-se por uma vasta área onde se contabilizaram à partida cerca de 1821 casas afectadas e 167 estabelecimentos comerciais e fábricas com danos de menor (LEES, 1995).

A explosão de Flixborough foi de longe a maior e mais severa, na história da indústria química no Reino Unido.



Figura 2.1 Imagem do acidente de Flixborough. (fonte: URL 1)

Antes da explosão, a 27 de Março de 1974, foi descoberta uma fenda onde existia uma fuga de Ciclohexano no reactor 5. A produção parou para análise do problema, surgindo como uma solução, fazer um *bypass* entre os reactores 4 e 6 de modo a continuar a produção.

A origem do acidente esteve no sistema de *bypass*, que rompeu devido a um incêndio numa conduta nas proximidades. Posteriormente ocorreu a fuga de ciclo-hexano (composto altamente inflamável) que, ao entrar em contacto com uma fonte de ignição formou uma explosão de nuvem de vapor (VCE, *Vapour Cloud Explosion*), propagando assim o incêndio a outras unidades da planta (URL 2).

2.2 Seveso

Na localidade de Meda próxima de Seveso de Milão, em Itália, no dia 9 de Julho de 1976, o rebentamento de um reactor em funcionamento na *ICMSA Chemical Company*, constituiu um dos maiores acidentes da história de Itália e na Europa. Após o rebentamento formou-se uma nuvem branca de gás mais pesado que o ar, que transportou várias substâncias tóxicas, onde se destacava uma pequena quantidade de 2,3,7,8-TetraCloroDibenzo-p-Dioxina (TCDD) (aproximadamente 2 kg), extremamente tóxico. Depois da libertação as autoridades foram avisadas do sucedido, mas devido à falta de experiência em lidar com este tipo de situações, gerou-se confusão nos meios de socorro e na população. Nos dias seguintes, muitos animais morreram e muitas pessoas adoeceram, o que levou à evacuação da população da área afectada. Não foram contabilizadas mortes directamente ligadas à exposição ao TCDD, mas foram registados algumas mulheres grávidas que abortaram espontaneamente e ainda hoje existem pessoas afectadas pelos efeitos do TCDD (LEES, 1995). Foi sem duvida um grande acidente a nível Europeu o qual levou a implementação de novas medidas de prevenção e controlo de AIG's, as Directivas SEVESO I e II.



Figura 2.2 Imagem do impacto do acidente em Seveso. (URL 3)

2.3 Bhopal

Na madrugada de 3 de Dezembro de 1984, ocorreu um acidente em Bhopal na Índia, considerado por muitos, o maior acidente industrial da história. O acidente teve lugar na fábrica de pesticidas da *Union Carbide* localizada na zona norte da cidade.

O acidente ocorreu quando foram libertados cerca de 40 toneladas de Isocianato de metilo que estava armazenado num reservatório refrigerado próximo da fronteira da fábrica com o exterior. Os vapores libertados desta substância são altamente tóxicos e podem provocar a morte por asfixia e a morte rápida das células expostas ao composto. As consequências do acidente foram muito severas devido à proximidade com uma zona densamente povoada, a comunidade de Bhopal.

Na origem deste acidente estiveram as más condições de conservação das instalações fabris, alguns procedimentos de segurança que não foram seguidos criteriosamente e as condições mecânicas e de operação da fábrica. A causa física directa do acidente está relacionada com a entrada de água no tanque, devido a um erro humano ou até mesmo sabotagem.

Foi a partir deste acidente que se começou a pensar seriamente na revisão da regulamentação que abrange a indústria química com o objectivo de evitar novos acidentes. É de realçar que este acontecimento marcou de forma irreversível todo o mundo e a forma como se encara todas as questões relacionadas com a segurança dentro e fora da fábrica (LEES, 1995).

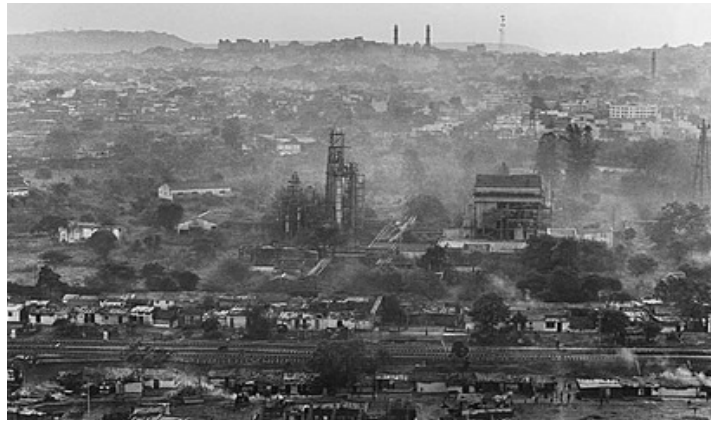


Figura 2.3 Imagem do impacto do acidente de Bhopal. (URL 4)

2.4 Basileia

Um incêndio numa instalação de armazenamento de produtos químicos, a 4 quilómetros do centro de Basileia (1986) na Suíça, causou o mais grave episódio de poluição no rio Reno. Este facto deveu-se ao derrame de pesticidas particularmente agressivos, constituídos por derivados orgânicos de mercúrio. 1250 toneladas de produtos inflamáveis, herbicidas, fungicidas, insecticidas, corantes, óleos e solventes; no final foram contabilizados 1,9 toneladas de Mercúrio no rio Reno. Durante o incêndio, nuvens de gás em chamas atingiram cerca de 80 metros de altura, recipientes metálicos de 200 litros contendo substâncias perigosas foram projectados acima das chamas, explodiram e caíram espalhados por uma vasta área. A população de Basileia (cerca de 300 000 habitantes na altura) foi aconselhada a permanecer em casa e a fechar portas e janelas. Cerca de 30 toneladas de substâncias perigosas foram arrastadas para o Reno pelos 10 000 m³ de água utilizados para combater o incêndio.

Várias aglomerações alemãs suspenderam o abastecimento de água potável. A Holanda adoptou medidas de emergência para a protecção da água para consumo humano. Ocorreu assim a contaminação das águas do Reno em mais de 10 000 km (sendo na foz do Reno onde se detectou elevadas concentrações de Mercúrio), ao longo de quatro países, constituindo a maior catástrofe ecológica da Europa ocidental (BORREGO, 1989).

2.5 Toulouse

O que se passou em Toulouse (quarta maior cidade francesa), no dia 21 de Setembro de 2001, demonstrou que o armazenamento de substâncias perigosas constitui um

grande risco, na medida em que este acidente afectou pessoas externas e internas às instalações. Neste acidente ocorreu a demolição/destruição por completo das instalações da AZF (*Azote de France*), uma fábrica de produção de fertilizantes de alto risco localizada na zona industrial de Toulouse. A explosão ocorreu num armazém, de armazenamento de nitrato de amónio em grão, separado por divisórias. Supõe-se que estariam entre 200 a 300 toneladas de nitrato de amónio, que era usado para a produção de fertilizantes. A causa exacta do acidente continua desconhecida. As consequências foram maiores devido à proximidade da instalação industrial a uma zona urbana, separadas apenas por uma auto-estrada (URL 5).



Figura 2.4 Imagem do impacto do acidente em Toulouse. (URL 6)

Com a evolução do conhecimento de AIG's, que existem estudos com o objectivo de elaborar bases de dados para memória futura alguns autores dividiram os tipos de acidentes e por fontes de acidente. A análise feita por Faisal I. Khan, S.A. Abbasi (1999) teve como objectivo de fazer um levantamento dos acidentes ocorridos entre o período compreendido entre de 1928/1997, num total de 1744 acidentes, cerca de 25% foram explosões e fogos, 71% libertações tóxicas e 4% uma combinação das duas. Ainda no mesmo estudo os autores indicam os factores que mais contribuem para acidentes graves em instalações fixas tabela 2.1 (KHAN e ABBASI, 1999).

Tabela 2.1 Factores que mais contribuem para acidentes graves em instalações fixas (KHAN e ABASSI, 1999).

	Número de vezes	Percentagem (%)
Falhas de equipamento	223	29.2
Falhas operacionais	160	20.9
Avaliação inadequada do material	120	15.7
Problemas no processo químico	83	10.9
Problemas associado ao transporte de materiais	69	9.0
Ineficácia nos Programa de prevenção de acidente	47	6.2
Problemas nas instalações da fábrica	27	3.5
Layout da fábrica inadequado	18	2.4
Estruturas em situação de não conformidade com os requisitos de utilização	17	2.2

A ocorrência destes acidentes evidencia, uma vez mais, que os grandes riscos da laboração industrial não se encontram necessariamente associados às indústrias petrolíferas, a indústria química actualmente não só utiliza processos cujo domínio exige elevado tecnicismo, como processa e armazena quantidades suficientemente elevadas de substâncias particularmente perigosas.

Os acidentes de Bhopal e Basileia ilustram bem os perigos que apresentam as indústrias químicas. A catástrofe de Bhopal matou e feriu milhares de pessoas ao passo que Basileia causou extensos e persistentes danos ao ambiente sem provocar mortes imediatas, disto permite concluir que as consequências destes acidentes afectam de facto seres humanos como o ambiente (BORREGO, 1989)

Os acidentes de consequências potencialmente graves podem traduzir-se nas seguintes situações – tipo:

- Emissão de grandes quantidades de substâncias tóxicas;
- Emissão de gases ou substâncias inflamáveis em quantidades elevadas;
- Emissão, mesmo em quantidades muito pequenas, de substâncias altamente tóxicas (caso de Seveso);

- Acidentes ou falhas nos processos produtivos envolvendo substâncias reactivas;
- Incêndios, explosões ou detonações graves.

Com isto pode definir-se um acidente industrial grave como sendo um: “ «*Acidente grave envolvendo substâncias perigosas*» um acontecimento, designadamente uma emissão, um incêndio ou uma explosão de graves proporções, resultante do desenvolvimento não controlado de processos durante o funcionamento de um estabelecimento abrangido pelo presente decreto-lei, que provoque um perigo grave, imediato ou retardado, para a saúde humana, no interior ou no exterior do estabelecimento, ou para o ambiente, que envolva uma ou mais substâncias perigosas” artigo 2º do Decreto de Lei 254/2007 de 12 de Julho.

3 Análise de Risco

No capítulo anterior a abordagem feita aos acidentes mais conhecidos da história, referiu-se que a análise destes seria o ponto de partida para analisar o risco inerente aos processos de produção e armazenamento de produtos químicos. O risco é definido como as consequências indesejadas de uma determinada actividade em relação à probabilidade de ocorrer. Portanto, o risco é constituído por duas variáveis distintas: a magnitude das consequências e as probabilidades de que estas aconteçam. Uma análise de risco normalmente consiste:

- Identificação de falhas de equipamento e identificação dos acontecimentos intermédios que conduzem a acidente e a situações de perigo;
- Cálculo de probabilidades de ocorrência dessas consequências indesejáveis (TNO, 2005)

3.1 Métodos de análise de risco para identificação de perigo

Os métodos de análise de risco para a identificação de perigos são usados principalmente para identificar situações perigosas e cenários para identificar falhas que podem levar a consequências indesejáveis. Neste capítulo irão ser abordadas alguns desses métodos.

3.1.1 Checklist

Checklist representa um dos métodos de análise mais simples de identificação de perigo. Uma *checklist* é uma lista de questões sobre a unidade industrial, suas condições de operação, de manutenção, bem como outras questões que necessitam de verificação, onde nada é deixado ao acaso. A *checklist* é uma ferramenta que exige um conhecimento, à priori, do processo, ou então deve ser baseada em valores standard. Esta análise é feita ao longo do projecto de construção da instalação e deve ser verificada e actualizada após cada alteração do processo. Contudo, uma *checklist* requer alguma prática e experiência pessoal de quem a elabora, podendo eventualmente ser feita por pessoal não experiente. As principais limitações desta metodologia são.

- É uma metodologia que demora algum tempo a ser desenvolvida e origina apenas resultados qualitativos, sem nenhum conhecimento do sistema analisado. Esta metodologia apenas nos fornece resultados para cada item do sistema na forma de “Sim” ou “Não”.
- Permite analisar um único item de cada vez, por isso não é possível identificar perigos que resultem da interacção dos diferentes componentes (e ou equipamentos).
- Esta análise melhora à medida que a capacidade e experiência da pessoa que a elaborou evolui. Há sempre probabilidade que alguns pontos críticos serem negligenciados.
- É impossível identificar os riscos com base no tipo de unidade de operação (reação, transferência de calor e armazenamento), na severidade das condições de funcionamento (temperatura e pressão) ou qualquer falha na operação (fuga ou produção de calor em excesso).

Mesmo depois de analisadas algumas limitações desta técnica, ainda é utilizada, apesar de não ser recomendada para estudos de análise de risco mais detalhados. (KHAN E ABBASI, 1998)

3.1.2 HAZOP [*Hazard and Operability Analysis*] – Estudo dos Perigos e da Operacionalidade

Trata-se de uma metodologia simples de identificação e avaliação de perigos (risco). Foi desenvolvida pela *Imperial Chemical Industries* em 1974 (UK). O princípio básico do estudo HAZOP é que todas as condições normais e standard são condições de segurança do sistema, e que qualquer desvio do normal pode trazer situações de risco. Este procedimento permite que os seus utilizadores possam fazer suposições com base na identificação de perigos e problemas na operacionalidade.

Num estudo HAZOP típico, são necessários documentos referentes à fase de concepção das unidades do processo e condições de operação, as quais são examinadas sistematicamente por um grupo de peritos. Qualquer causa anormal ou consequência adversa para os desvios das condições normais de funcionamento são identificados para cada unidade de produção. A realização do estudo HAZOP requer uma equipa multidisciplinar de peritos possuidores de uma vasta experiência na concepção, condições de operação e manutenção do processo. Para cobrir todos os possíveis maus funcionamentos na unidade a imaginação dos elementos da equipa

responsável pelo HAZOP é guiada sistematicamente por palavras - guia de forma a poder gerar desvios nas variáveis do processo.

Assim sendo, o HAZOP:

- Permite ter uma ideia de prioridades a ter, estabelecendo uma base para uma análise de risco detalhada;
- Fornece a primeira informação dos potenciais riscos, as suas causas e consequências;
- São sugeridas formas para a mitigação do risco;
- Pode ser aplicado tanto na fase de concepção/execução, bem como, na fase de operação;
- Serve de base para os passos seguintes num programa de gestão de riscos.

O estudo HAZOP da forma em que é utilizada apresenta algumas limitações. A primeira surge das considerações assumidas, que são fundamentais para o método e a limitação de alcance do mesmo. A segunda, deve-se ao facto deste método assumir que o processo/equipamentos, foram concebidos de acordo com as normas, isto é, o estudo parte duma premissa que todo o equipamento foi feito para operar nas condições normais de operação. Em suma, apenas tenta identificar desvios às supostas condições normais. (KHAN e ABBASI, 1998)

3.1.3 FMEA [*Failure modes and effect analysis*] – Análise dos modos de falha e dos seus efeitos

FMEA é uma análise dos componentes individuais, por exemplo, bombas, depósitos, válvulas, etc. Esta análise pretende identificar as possíveis falhas que podem ocorrer e os efeitos indesejáveis associados a essas falhas nos sistemas de operação ou processo produtivo. FMEA engloba os seguintes passos:

1. Identificação de cada tipo de falha, e a consequência das mesmas associadas às causas e efeitos;
2. Classificação de cada tipo de falha através das características relevantes como, capacidade de diagnóstico, capacidade de teste, hipótese de substituição, capacidade de compensação e condições de operação.

O tipo de informação necessária para obter uma FMEA:

- Estrutura do sistema;
- Descrição do sistema, operação, controlo e manutenção;
- Ambiente do sistema;
- Modelo do sistema
- Software do sistema;
- Fronteira do sistema;
- Estrutura funcional do sistema e sua representação;
- Diagrama de blocos
- Falhas significantes e condições de operação.

A FMEA é iniciada com uma lista de possíveis modos de falhas tendo em conta:

- A finalidade do sistema;
- Os elementos envolvidos;
- O modo de operação;
- Especificações do processo;
- Limitações em termos de tempo;
- Ambiente envolvente.

A FMEA é eficiente na análise dos elementos que podem causar uma falha total ou de grande parte do sistema. Este método é mais funcional quando a lógica da falha é pouco complexa, torna-se mais difícil de aplicar quando esta é mais complexa.

A essência da FMEA é meramente indutiva, sendo que a Análise de Árvore de falhas (Fault Tree Analysis, FTA) pode dar uma vertente dedutiva ao estudo complementando-o, o que é bastante importante na análise lógica de sistemas complexos. Esta análise é boa para gerar uma base de dados de falhas a nível de componentes do sistema. Esta é recomendada para a identificação de riscos na vertente técnica para sistemas que trabalham com operações de risco baixo a moderado ou aqueles que não podem suportar um estudo HAZOP devido ao seu carácter moroso.

FMEA pode ser um processo muito trabalhoso e ineficiente se não for aplicado de forma prudente. Este é incapaz de lidar com interações com vários componentes do sistema e necessita de uma equipa de peritos bastante qualificados para o desenvolverem atempadamente. Uma das falhas, situa-se no facto de este método ser normalmente direccionado para a um tipo de componentes, enquanto que o perigo resulta de sub-componentes do sistema. (KHAN e ABBASI, 1998)

3.1.4 MCAA [*Maximum credible accident analysis*] – Análise de Cenários de Acidente mais Credíveis

O conceito de cenário de acidente credível é um dos mais poderosos e amplamente utilizados nas diferentes metodologias de análise de risco, mais especificamente na análise de acidentes com maior credibilidade (MCAA) e na análise quantitativa de Riscos (QRA). Este conceito envolve os seguintes passos:

1. Desenvolver cenários de acidente credíveis. Para qualquer unidade de uma indústria a ser analisada é desenvolvido um conjunto de cenários credíveis atendendo à probabilidade de ocorrência, bem como à escala a que os danos possam acontecer.
2. Delinear bem os limites máximos e classificar os cenários mais credíveis estes acidentes como mais credíveis, tendo em atenção até os menos credíveis.
3. Estes cenários também são classificados com base nos potenciais danos que possam ocorrer recorrendo a modelos matemáticos de simulação.
4. Estimar o risco com base no prejuízo potencial estimado no passo 3 e com a probabilidade de ocorrência deste tipo de acidentes mais credíveis estima-se o risco. (KHAN e ABBASI, 2002)

3.2 Análise da frequência de ocorrência de acidentes

A análise de frequência de ocorrência de acidentes ou situações de perigo num determinado período de tempo. É baseada no cálculo da probabilidade de ocorrência de consequências indesejáveis associadas a um determinado evento.

3.2.1 FTA [*Fault Tree Analysis*] - Análise de Árvore de Falhas

A técnica de árvore de falhas é uma poderosa ferramenta para estimar a fiabilidade e disponibilidade de sistemas complexos. De alguns anos para cá tem vindo a ser consolidada em diversos domínios da indústria como um instrumento de apoio na fase de concepção.

A Análise de Árvore de Falhas (FTA) é uma formalização dedutiva da técnica que permite a investigação das causas possíveis da ocorrência de estados indesejáveis do sistema. Estes estados são designados por Eventos de Topo estão associados aos comportamentos anormais do sistema, causados por falhas de hardware, erros humanos ou perturbações causadas por pessoas vindas do exterior. A partir da descrição do Evento de Topo a metodologia de FTA permite a descrição sistemática

de relações entre os eventos, em diferentes níveis de decomposição do sistema através de operadores de Lógica *Booleana*.

O resultado da análise de FTA dá informações úteis sobre como melhorar o desempenho do sistema, através da identificação das partes mais sensíveis, onde podem ser adoptadas mudanças mais eficazes no design ou estrutura do componente.

No processo de FTA existe um passo importante que é a determinação dos *Minimal Cut Sets* (MCSs), que são factores críticos que quando combinados dão origem ao Evento de Topo. No passado foram desenvolvidos diferentes métodos para determinar os MCSs. A maior parte dos métodos desenvolvidos para computador baseiam-se em diferentes técnicas:

- Top – Down;
- Bottom – Up.

Teoricamente, estas técnicas são muito simples: todos as entradas são substituídas por eventos até que o conjunto de eventos primários seja encontrado. No caso da técnica de *Top Down* (TD) a redução começa a partir do evento de topo, enquanto na técnica de *Bottom – Up* (BU) os pontos de partida são as entradas do sistema tendo apenas eventos primários como variáveis de entrada. (CONTINI, 1995)

3.2.2 ETA [*Event Tree Analysis*] - Análise de Árvore de Eventos

Análise de Árvore de Eventos (ETA) avalia o potencial de ocorrência de um determinado acidente como resultado duma falha dum equipamento ou perturbação no processo conhecido como Evento Inicial. A ETA é uma forma de induzir no processo uma alteração, em que começa por um evento inicial e a partir daí desenvolve possíveis consequências do mesmo evento, normalmente utilizado para resposta a um acidente numa fábrica. Esta análise proporciona uma forma sistemática de registar o acidente e definir as sequências em relação a um evento inicial e acontecimentos posteriores que possam causar um acidente. Dado um evento inicial, é analisado o conjunto de todas as consequências consideradas na ETA.

Esta técnica é universalmente aplicada a todos os tipos de sistemas, com a limitação que os eventos não desejados devem ser antecipados para produzir resultados analíticos significativos. Pode ser aprofundada de forma exaustiva e a sua solidez tem dois limites teóricos, todos os eventos devem ser antecipados e todas as consequências devem ser conhecidas.

Os requisitos desta técnica, para sistemas mais complexos, são a necessidade de ser feita por peritos especializados na área em estudo, e uma grande disponibilidade de tempo. É uma técnica que não é difícil de aplicar mas demorada, em que grande parte do tempo é gasto na exploração de todos os eventos e as suas consequências.

É sem dúvida uma boa técnica quando bem aplicada, de forma exaustiva, apesar da grande quantidade de recursos que consome. A sua utilização normalmente é reservada a sistemas em que os riscos são altos e dissimulados. (TNO, 2005)

3.3 Alguns projectos internacionais

3.3.1 Projecto BEMHA

O primeiro projecto criado para a Análise de Riscos Graves foi o BEMHA, acrónimo de “*Benchmark Exercise on Major Hazards Analysis*” e teve a duração de dois anos (1988 -1990). Este estudo teve a coordenação do *Joint Research Centre* (JRC) e financiado em parte pela Comunidade Europeia, onde foram representados institutos de investigação, empresas de engenharia, autoridades competentes e indústrias para desenvolver um estudo sobre a análise de risco. O estudo teve como objectivo avaliar o estado da arte no que concede à análise de risco, foi necessário compreender os métodos disponíveis, os seus pontos forte e menos fortes, bem como a análise das incertezas envolvidas e o impacto destas sobre os resultados.

Este estudo teve como objecto de investigação uma instalação de armazenamento de amoníaco, 11 equipas estudaram-no de forma independente para posteriormente compararem os resultados. Os resultados obtidos foram satisfatórios visto que foram bastante úteis tanto para a comunidade científica como para todas as partes interessadas. (CHRISTOU *et al.*, 1999)

3.3.2 ASSURANCE

ASSURANCE é o acrónimo de “*ASSessment of the Uncertainties in Risk ANALysis of Chemical Establishments*”, o projecto teve início em 1998 e acabou em 2001, constituiu uma análise comparativa às análises de risco em instalações químicas para tentar compreender as discrepâncias entre especialistas. Teve como intuito comparar a selecção de cenários, estimativas das consequências bem como a comparação das estimativas das probabilidades de ocorrência. Desta forma veio confirmar que havia

discrepâncias entre os especialistas na definição de cenários considerados para a avaliação de risco. Algumas hipóteses revelaram-se muito diferentes o que levou a um forte impacto no cálculo das consequências. Houve também alguma discrepância na estimativa de probabilidades de alguns eventos, devido à possível falta de credibilidade dos dados, neste caso, taxas de falhas e fiabilidade. (SALVI e DEBRAY, 2006)

3.3.3 ARAMIS – [*Accidental Risk Assessment Methodology for Industries*]

A metodologia ARAMIS foi desenvolvida num projecto europeu co-financiado no quinto Programa Quadro da Comissão Europeia com o objectivo de responder às exigências específicas da Directiva Seveso II. Este projecto pretendeu fazer uma alternativa à abordagem puramente determinística e probabilística da avaliação de riscos de processos em estabelecimentos considerados potencialmente perigosos. Este também tenta responder à necessidade das partes interessadas em relação aos resultados da análise de risco no que concerne ao uso do solo, planeamento e actuação em caso de emergência e até mesmo ao processo de tomada de decisão. A metodologia dividiu-se nas seguintes etapas:

1. Identificação de riscos que poderão causar acidentes graves;
2. Avaliação das principais barreiras de segurança e avaliação do seu desempenho;
3. Avaliação da eficiência na gestão de segurança e da fiabilidade das barreiras;
4. Identificação dos cenários de acidente de referência;
5. Elaboração e avaliação de mapas de risco e cenários de referência atendendo à vulnerabilidade da planta da fábrica.

O projecto ARAMIS testou cinco casos de estudo, forneceu informações úteis sobre a aplicabilidade do método, e identificou as partes mais sensíveis e abriu caminho para que novas investigações levassem a cabo propostas de melhoria da actividade industrial. (SALVI E DEBRAY, 2006)

3.4 Análise de risco na América Norte e na Europa

A análise de risco é diferente para as diferentes zonas do globo, divididas essencialmente em dois grandes grupos, a abordagem norte americana e a abordagem europeia, seguidamente serão apresentados alguns exemplos destas.

3.4.1 América do Norte

3.4.1.1 Estados Unidos da América

Em 1990, o Congresso americano redigiu emendas ao “*Clean Air Act*” de 1990, em que sugeria que a Environment Protection Agency (EPA) publicasse regulamentos e guias para a prevenção de acidentes químicos em estabelecimentos que manuseassem substâncias perigosas. Surge então, o “*Risk Management Program Rule*”, construído sobre códigos e normas existentes na indústria, e que solicitava que todas as empresas, de todos os tamanhos, que manuseassem certas substâncias perigosas desenvolvessem um “*Risk Management Program*” (Programa de Gestão do Risco).

Em 1999, um sumário do *Risk Management Program* dos estabelecimentos, conhecido como *Risk Management Plan* ou RMP, foi entregue à EPA para posterior acesso da população à informação. Os RMP's têm de ser revistos e entregues em cada 5 anos. O *Risk Management Program* diz respeito à redução do risco químico ao nível local. A informação presente ajuda os bombeiros, a polícia e as equipas de emergência (que têm de estar preparados para e responder a acidentes químicos), e é útil para os cidadãos entenderem os perigos químicos manuseados nas unidades fabris localizados próximo das comunidades em que vivem. A EPA disponibiliza no seu site da Internet todos os guias necessários para a elaboração do *Risk Management Program*.

O “*General Guidance for Risk Management Programs*” da “*Risk Management Series*” foi feito para ajudar os proprietários e operadores de estabelecimentos que produzam, usem, armazenem ou manuseiem certas substâncias químicas extremamente perigosas, a verificar se estão sujeitos aos regulamentos da “*EPA's Chemical Accident Prevention*”. A EPA publicou também, guias específicos para algumas indústrias, os “*Guidance for Industry-specific Risk Management Programs*”, nomeadamente para (RMP - EPA, 2004):

- Armazenamento de propano;
- Distribuidores de substâncias químicas;

- Armazéns;
- Refrigeração com amónia;
- Estações de tratamento de água.

O “*Risk Management Program Guidance for Offsite Consequence Analysis*” publicado pela EPA (guia do programa de gestão de risco para a análise de consequências *off-site*) para os proprietários e operadores abrangidos pelo *Chemical Accident Prevention Program rule* na análise das consequências *off-site* de fugas acidentais de substâncias reguladas (RMP-EPA, 1999).

3.4.1.2 Canadá

Após o acidente do Bhopal, um grupo de peritos, industriais e ONG’s foram incumbidos pelo *Environment Canada* para fazer uma avaliação da situação no que diz respeito a acidentes graves, tentando imprimir melhorias e/ou recomendações às autoridades. O resultado foi um relatório intitulado “revisão posterior a Bhopal: uma validação da situação Canadiana” (Environment, 1986) onde foram publicadas 21 recomendações. Estas recomendações têm servido de orientação para o controlo na área das substâncias perigosas. Com isto as autoridades canadianas conseguiram, depois de Bhopal, inovar através da adopção de uma abordagem consultiva em detrimento de legislar.

Em 1987 o *Environment Canada* instituiu o *Major Industrial Accidents Council of Canada* (MIACC), uma organização sem fins lucrativos financiada pelo estado central e regional, como uma alternativa ao estado no acto de legislar e regulamentar, sendo o MIACC mais um processo que uma estrutura. Governo, indústrias, autoridades de protecção civil, sindicatos e ONG’s entre outros tiveram que partilhar os seus conhecimentos, como uma parceria para o desenvolvimento de normas, documentos de orientação nas áreas da prevenção, preparação, resposta e recuperação. O MIACC foi baseado no *Canadian Chemical Producers Association* (CCPA) numa iniciativa de *Responsible Care* com isto teve que reunir um forte consenso entre os intervenientes.



Figura 3.1 Esquema triangular dos stakeholders envolvidos na segurança. (fonte: (LACOURSIERE, 2005))

Em 1999 é abandonado o projecto MIACC mas no entanto ficou a cultura de parceria e de trabalho em conjunto para o objectivo comum, o desenvolvimento de regulamentação. Mais tarde, no ano 2001 muito tinha sido feito acerca de regulamentação e legislação para controlo de acidentes industriais e controlo de riscos e resposta em caso de acidente. A legislação estendia-se a reservatórios de armazenamento sobre pressão, produtos inflamáveis e um sistema de regulamentos que regem questões de segurança, saúde ambiente. (LACOURSIERE, 2005)

A abordagem ao risco tecnológico não é uniforme em todo o mundo tendo uma variabilidade em relação aos locais onde são feitas. Na América do Norte é apenas qualitativa, enquanto que, na Europa é observada uma maior diversidade na abordagem tomada, em parte devida a questões históricas e/ou culturais. A abordagem assumida pela França é um exemplo na medida em que são combinadas as abordagens quantitativa e qualitativa, obtendo-se assim uma avaliação de riscos mais completa.

3.4.2 Europa

3.4.2.1 Holanda

O desenvolvimento da política externa de segurança Holandesa na forma actual, surgiu no início da década de 1980, quando se tornou clara que a utilização do GPL aumentaria consideravelmente. Extensos estudos sobre questões de segurança relacionados com o GPL conduziram ao desenvolvimento de um sistema de avaliação que se baseia na avaliação quantitativa de riscos e dos critérios quantitativos para a aceitabilidade na tomada de decisão. A ocorrência de uma série de acidentes graves

como Flixbourough, Beek, Cidade do México, Los Alfaques, Seveso, Bhopal bem como a directiva Seveso I levou a que as autoridades pensassem acerca da prevenção de acidentes graves. Na Holanda no período de 1982 a 1987 foi realizado um estudo chamado COVO que focava essencialmente a utilização do GPL, culminando na elaboração dum relatório em 1984 com 24 volumes sobre todos os aspectos de segurança no caso de armazenamento, transporte e utilização do GPL em veículos automóveis. Este estudo serviu de base para um *Memorandum* integral sobre o GPL que foi aceite posteriormente pelo parlamento em 1984 definindo assim três elementos essenciais que serviram de base para a política externa de segurança Holandesa, sendo estes:

- Recurso à avaliação quantitativa de riscos QRA, para determinação de riscos;
- Adopção de dois parâmetros de risco, Risco social e Risco individual;
- Critérios de aceitabilidade tanto para o risco social como para o risco individual.
- Em termos práticos, o memorando afirmou a necessidade de manter distâncias de segurança entre o GPL e actividades e objectos vulneráveis (casas). As distâncias de segurança são baseadas em QRA e critérios de aceitabilidade de risco. A avaliação de risco teve em conta as medidas de segurança para as actividades que manuseiam o GPL legalmente reconhecidas. Com estes estudos de avaliação quantitativa de risco foi encontrado um instrumento mais eficaz de prevenção e de controlo de perigos relacionados com este tipo de actividades. (BOTTELBERGHS, 2000)

3.4.2.2 França

Desde 1810 que em França a prevenção e controlo do risco no redor e dentro de instalações Industriais perigosas tem evoluído, de forma gradual, sempre a partir de acidentes (CAHEN, 2006). O decreto imperial de 1810 dava ao governador civil a possibilidade de definir uma distância de afastamento entre a população e as actividades julgadas perigosas ou insalubres. A lei de 19 de Dezembro de 1917 relativa aos estabelecimentos perigosos, insalubres ou incómodos, interditava a construção de novos estabelecimentos perigosos dentro das zonas reservadas à habitação. Depois da lei de 19 de Julho de 1976, esta obrigação é retirada e a apreciação da necessidade de afastamento é concedida ao governador civil no momento da autorização (PPRT, 2005).

A falta de ferramentas legislativas, que permitissem a compensação dos proprietários na manutenção de distâncias de segurança e, a pressão exercida no uso do solo no redor destes estabelecimentos, na segunda metade do século XX, explica, em parte, o desenvolvimento urbano no redor de praticamente todos os grandes estabelecimentos químicos e petroquímicos nos dias de hoje (CAHEN, 2006).

No rescaldo do acidente de 21 de Setembro de 2001, em Toulouse, surge a lei nº 2003-699 de 30 de Julho de 2003, relativa à prevenção dos riscos tecnológicos e naturais e à reparação dos danos. Esta lei introduziu, o princípio do estudo de perigos, baseado na análise de risco que não só tivesse em conta a gravidade potencial, como também, a probabilidade de ocorrência dos acidentes. Esta lei prevê a elaboração de “*Plans de Prévention des Risques Technologiques* “ (PPRT, 2005), planos de prevenção de riscos tecnológicos (PPRT, 2005) e, muitos dos conceitos presentes nos PPRT são comuns aos apresentados no projecto ARAMIS.

Os PPRT têm como resultado a limitação da exposição da população às consequências de acidentes, o impacto dos quais, é compreendido via os estudos de perigo produzidos pelo estabelecimento industrial (CAHEN, 2006) e, destinam-se à redacção da configuração, a longo prazo, da urbanização que esteja em redor de estabelecimentos perigosos (SALVI *et al.*, 2005).

Os PPRT incluem a elaboração de cartas em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), que sobreponham os vários tipos de risco (tóxico, térmico e sobrepressão) e a vulnerabilidade.

3.5 Análise de risco em Portugal, caso particular - Aveiro

3.5.1 SECUR-RIA

É um projecto que teve como um dos principal objectivo formar e informar os cidadãos a comportarem-se de forma correcta em situações de emergência. A produção de planos municipais de segurança e emergência e a sua publicação e difusão através da internet torna mais fácil a conjugação de processos a nível intermunicipal, tendo em conta locais como escolas, Hospitais e equipamento público. A integração da população é fundamental para poder contribuir para o levantamento de situações no terreno, com o objectivo de criar melhores condições de segurança. Isto levou à elaboração de uma Carta de Segurança em formato de base de Dados Georreferenciada onde estão identificadas as zonas de situação de risco com

informação associada detalhada, onde estão também identificados os sistemas de segurança e respostas a situações de emergência.

Foi sem dúvida uma inovação em Portugal para a gestão de resposta a situações de emergência, visto ser uma ferramenta fundamental para o planeamento de investimentos e coordenação de meios tanto a nível municipal e regional.

Este projecto teve como parceiros a Associação de Municípios da Ria (Águeda, Albergaria-a-Velha, Aveiro, Estarreja, Ílhavo, Mira, Murtosa, Oliveira do Bairro, Ovar, Sever do Vouga e Vagos (URL 7).

3.5.2 PACOPAR

O PACOPAR teve origem em 2001 quando empresas do complexo químico de Estarreja decidiram abandonar as políticas de aproximação baseada em iniciativas individuais. Posteriormente decidiram unir-se para formar um fórum alargado às partes interessadas, onde era necessário trazer à discussão questões que interessassem à comunidade promovendo assim uma política de boa vizinhança e em que existiria uma transparência de processos que fosse correctamente perspectivada pela comunidade.

Este tipo de processo tem vindo a ganhar espaço na comunidade, tendo em vista a sua consolidação final. Os membros efectivos do Pacopar tais como, poder autárquico, entidades de Socorro, saúde, entre outros tornam o Painel Pacopar credível dado o peso institucional que cada um representa na sociedade.

Fazem parte deste Painel as empresas Airliquide, AQP, Cires, Dow, Quimigal, a Associação Portuguesa de Empresas Químicas (APEQ), a Câmara Municipal de Estarreja, os Bombeiros Voluntários de Estarreja, o Hospital Visconde de Salreu e o Centro de Saúde de Estarreja, a Associação Empresarial SEMA, a Escola Secundária de Estarreja e o Agrupamento Vertical de Escolas Padre Donaciano Abreu Freire, o Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, as Associações Ambientalistas Quercus e Cegonha e a Guarda Nacional Republicana.

Uma característica interessante deste Painel é o facto de ter aderido ao programa voluntário Actuação Responsável (*Responsible Care*), o qual representa o compromisso e a iniciativa da Indústria Química mundial para a garantia e desenvolvimento da segurança e prevenção ambiental em todas as fases do ciclo de vida dos produtos.

Trata-se de um compromisso mediante o qual as empresas se comprometem unilateralmente a melhorar continuamente o seu desempenho em saúde, segurança e ambiente, dando público testemunho do seu comportamento e dos progressos alcançados, na procura de um desenvolvimento sustentável.

Diversas iniciativas das quais se destacam a realização de seminários, sessões de formação e diversas jornadas de portas abertas das empresas do CQE foram criando um relacionamento de proximidade entre as instituições da comunidade representadas no Painel (URL 8).

4 Dispersão atmosférica de gases pesados

A dispersão de gases mais pesados que o ar (gases pesados) é de facto, um problema inerente aos grandes AIG's, isto devido à libertação de gases tóxicos e ou inflamáveis, bem como explosões ou fogos o que provocam muitas vezes a situação de perigo para as populações vizinhas. Nos casos de libertação accidental o potencial de dano em termos de área afectada é máximo, dependendo do tipo de químico, condições meteorológicas e características do local (KHAN e ABASSI, 1999).

Da análise dos acidentes ocorridos é possível verificar que, a dispersão atmosférica é responsável pelo transporte de gases pesados, resultantes da combustão de explosões/fogos ocorridos em instalações, bem como fugas dos mesmos. Da análise feita no segundo capítulo pode-se verificar que em Seveso, a libertação de 2 kg de um químico altamente tóxico resultou na contaminação duma vasta área. No caso de violentas explosões acompanhadas de libertações de compostos tóxicos como em Flixbourough e Bhopal, as condições da atmosfera tiveram um papel importante na dispersão de compostos químicos tóxicos, ampliando os danos causados ao ambiente e nas populações.

O recente interesse nesta área foi estimulado pela publicação das Directivas Seveso I e II, resultantes da necessidade de estudos em situação de libertações accidentais no âmbito do planeamento de emergências. (NIELSEN, 1998).

Gases que apresentam comportamento de gás mais pesado que o ar têm uma massa volúmica superior à do ar, massa molar aproximadamente igual à do ar que em determinadas condições de temperatura se comportam como gases pesados, ou produtos que ao sofrerem reacção com outros compostos também podem ter o mesmo comportamento (BRITTER, 1982).

A dispersão na atmosfera é essencialmente influenciada pela gravidade, ao contrário dos gases passivos, nos quais a força de gravidade, é normalmente desprezada. É conhecido que as nuvens de flutuação negativa, ou seja de gás pesado, se dispersam de forma diferente de uma nuvem de um traçador passivo. A força da gravidade influencia a nuvem de duas formas, a formação de correntes internas, bem como a estratificação no interior da nuvem que levam à redução da mistura turbulenta com o ar. O estudo de libertações com formação de nuvens com comportamento de gases pesados foi um ramo científico em que a investigação teve um abrandamento no início

da última década (NIELSEN, 1998) e têm sido objecto de novos estudos mais recentemente.

Os compostos utilizados pela indústria, normalmente gases, são armazenados ou transportados na forma líquida em condições de pressão alta ou temperatura baixa, dada a vantagem de transportar/armazenar quantidades maiores com volumes menores. No entanto, no caso de libertação accidental as quantidades em causa e a possibilidade de formação de nuvens de gás pesado amplificam o perigo de tal situação (NIELSEN, 1998). O estudo da dispersão de gases pesados ganha assim grande relevância, uma vez que, na eventualidade da libertação de produtos perigosos, as nuvens formadas têm muitas vezes o comportamento de gases pesados.

4.1 Formação da nuvem

A nuvem com comportamento de gás pesado resulta das propriedades do material libertado, mas também da forma como estão armazenados e como são libertados. A formação da nuvem é explicada, no caso de um produto com elevada massa molar, pela sua massa molar e consequente formação da nuvem com maior massa volúmica que o ar ambiente. No caso de compostos de massa molar inferior á do ar, outros fenómenos actuam. Um desses fenómenos é o “*Flashing*”, que ocorre quando a libertação consiste num composto armazenado no estado líquido, que em condições normais de pressão e temperatura se encontra no estado gasoso. O composto uma vez libertado, entra imediatamente em ebulição, evaporando muito rapidamente parte do volume inicial. Devido à violência do processo, uma fracção variável de líquido pode ser projectado para o ar, formando um aerossol de gotas líquidas, suficientemente pequenas para que a sua velocidade de queda seja desprezável. Simultaneamente ocorre uma diminuição de temperatura da atmosfera envolvente e a diminuição da taxa de evaporação. No decorrer deste fenómeno, é promovida a mistura turbulenta da nuvem com o ar. (BORREGO *et al.*, 1989, NIELSEN, 1998).

A nuvem formada, com temperatura inferior à temperatura atmosférica, permite assim, a ocorrência de fenómenos importantes de transferência de calor no interior e na fronteira da nuvem (BORREGO *et al.*, 1989, NIELSEN, 1998).

4.2 Comportamento de uma nuvem de gases pesados

A dispersão atmosférica da nuvem resultante da libertação de gases pesados, é afectada por vários fenómenos físicos, nomeadamente pela estagnação da turbulência

devido ao gradiente de massa volúmica estável no interior da nuvem; pela alteração dos campos de vento devido ao fluxo gravitacional e quantidade de movimento inicial da fonte; efeitos termodinâmicos na temperatura da nuvem como flutuação e turbulência resultante da formação e evaporação de gotas de líquido e, por fim, a transferência de calor entre a nuvem e o solo, no caso de libertação de materiais aquecidos ou criogénicos. (CERC, 2002)

A diferença de massa volúmica entre o interior da nuvem e o ar ambiente é factor chave da dinâmica de gases pesados. (NIELSEN, 1998) As velocidades horizontais, geradas pelo gradiente de massa volúmica, são um mecanismo de transporte adicional em relação ao campo gravitacional gerado pela massa de ar ambiente. Este fluxo interno, produz uma nuvem que se estende mais na horizontal do que na vertical, quando comparada com uma nuvem passiva, na qual não ocorrem grandes diferenças nos gradientes de massa volúmica. (CERC, 2002) Esta componente de transporte horizontal, origina perfis laterais de concentração geralmente uniformes. (BRITTER, 1989, CERC, 2002). O campo de velocidades gerado no interior da nuvem, dá origem a uma forte interacção entre o fluido da nuvem e o ar ambiente, o que pode levar à formação de turbulência e assim promove a mistura turbulenta e diluição da nuvem. Sendo mecanismo de diluição de grande importância quando o campo de velocidades auto gerado é elevado quando comparado com o campo de velocidades no ar ambiente. A diluição da nuvem é frequentemente influenciada pela turbulência do ambiente, contudo num campo gravitacional com um gradiente vertical estável e estratificado, essa mesma influência da turbulência, pode ser muito reduzida ou mesmo completamente inibida, devido a este efeito poder abranger a turbulência atmosférica, o campo de ventos sobre a nuvem, bem como no interior da nuvem. (CERC, 2002)

Apesar do comportamento do material libertado ser directamente influenciado pela massa volúmica da nuvem formada pela libertação, quando a diferença de massa volúmica da nuvem formada é pequena em relação à do ar ambiente, a influência sobre os gradientes de massa volúmica no transporte pode ser desprezada. Contudo este facto pode não ser válido próximo da fonte. (NIELSEN, 1998, CERC, 2002)

Os efeitos anteriormente descritos reforçam a diferença entre a dispersão de gases pesados e a dispersão de gases não pesados, neutros ou positivamente flutuantes. Uma pequena libertação sobre condições de ventos fortes pode ser considerada como passiva. (CERC, 2002)

4.2.1 Libertações instantâneas

No caso de ocorrer uma libertação instantânea, esta pode ter origem na falha/ruptura catastrófica de um depósito de armazenamento, dando origem a uma nuvem aproximadamente cilíndrica que devido à aceleração da gravidade, entra em colapso na direcção do solo, espalhando-se como sendo um líquido (Figura 4.1) (BORREGO *et al.*, 1989)

Durante o colapso da nuvem, devido ao gradiente de massa volúmica, gera-se um acentuado movimento turbulento no interior da própria nuvem, caracterizado essencialmente pelo avanço radial da base da nuvem em direcção ao exterior, que retarda repentinamente na extremidade da nuvem e ascende, dando lugar à passagem de novas massas, em rápido movimento, num processo cíclico. Em seguida forma-se junto ao solo um vórtice com movimento circular no plano vertical, em direcção ao exterior na base e em direcção ao centro no topo, sendo assim gerada turbulência que facilita a diluição da nuvem com entrada de ar, principalmente na frente da nuvem. (CERC, 2002)

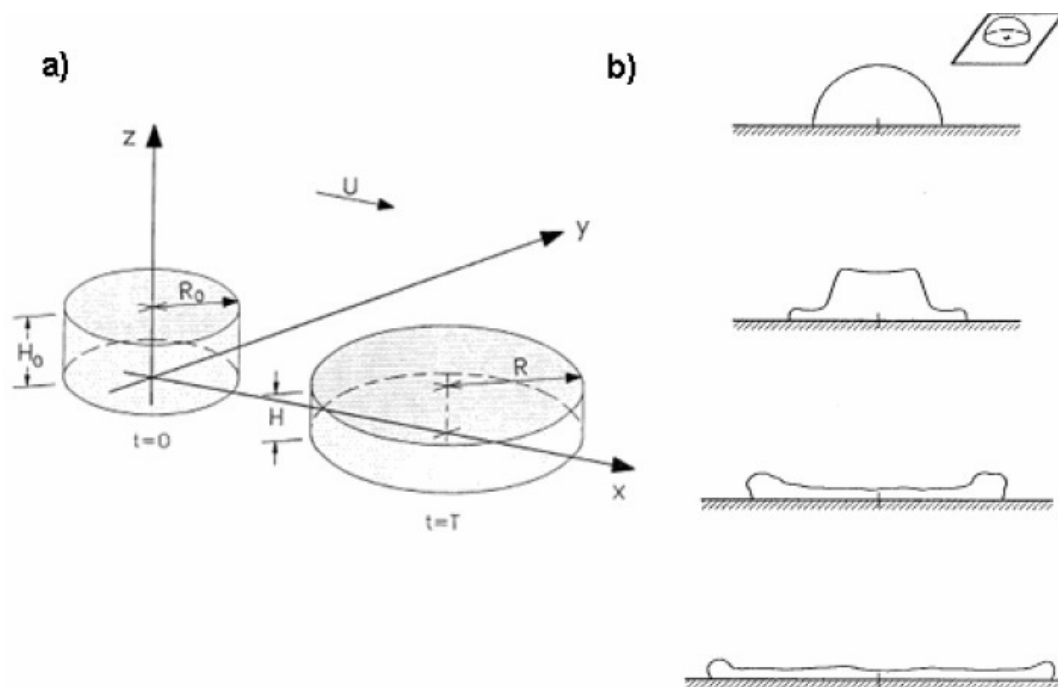


Figura 4.1 a) Representação esquemática de uma nuvem de uma libertação instantânea num modelo de caixa; b) Representação esquemática da evolução de uma nuvem de libertação instantânea.

A nuvem com uma forma semelhante a um disco, espalha-se lentamente com altura aproximadamente constante, sofrendo advecção pelo movimento de ar atmosférico. (BRITTER, 1989, CERC, 2002)

4.2.2 Libertações contínuas

Libertações contínuas de fontes ao nível do solo, ou próximas, têm um comportamento semelhante, em alguns aspectos, a uma libertação instantânea.

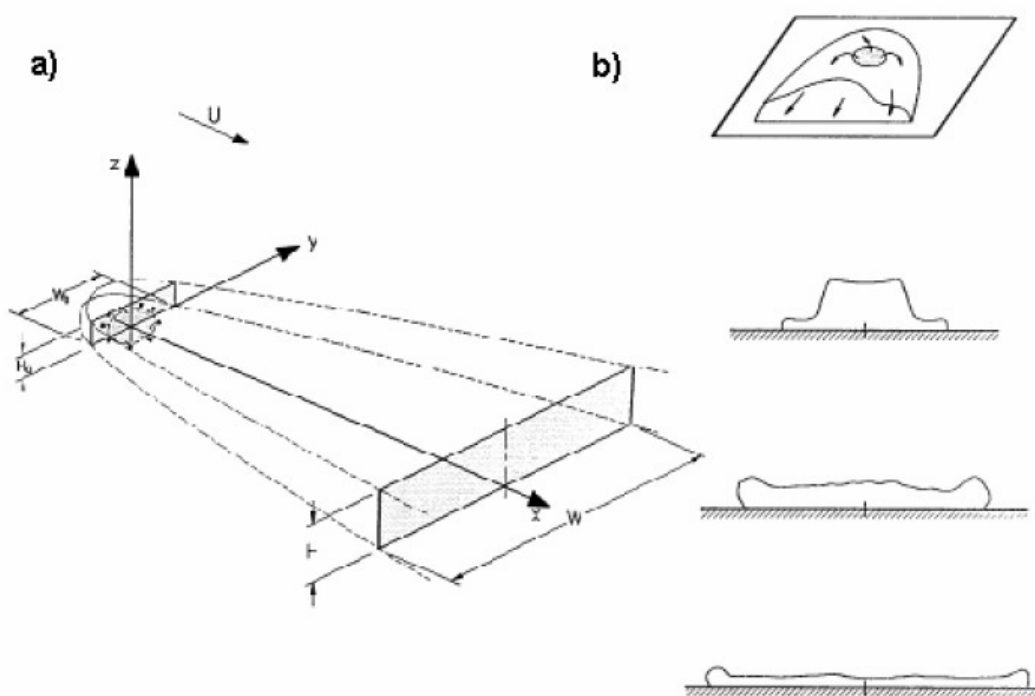


Figura 4.2 a) Representação esquemática de uma nuvem de uma libertação contínua num modelo de caixa; b) Representação esquemática da evolução de uma nuvem de libertação contínua.

Trabalhos de campo e laboratoriais (BRITTER, 1989), demonstram que pode ocorrer movimento da nuvem de massa volúmica superior à do ar para montante da fonte, cujo movimento é limitado pela velocidade do vento, ocorrendo em casos de grandes libertações e em situações de vento fraco. O mecanismo de formação deste fluxo contrário não é totalmente conhecido. No caso de se tratar duma fonte com fluxo de saída uniforme, o fluxo contrário pode ocorrer, mas apenas através de um processo inercial sem mistura (CERC, 2002). A interacção do fluxo é menos clara quando o fluxo na camada limite da atmosfera é turbulento. Nesta situação, em que este é

influenciado pela força gravidade nas proximidades da fonte, pode envolver uma interacção inercial do fluido por parte do fluxo ambiente (BRITTER, 1989, CERC., 2002). Este tipo de mecanismo permite a deslocação da nuvem na direcção contrária à do vento, bem como na transversal antes de sofrer advecção pelo movimento do ar atmosférico. (CERC, 2002)

A jusante da fonte, a nuvem aumenta na lateral devido aos processos de difusão atmosférico e de flutuação lateral induzida. (BRITTER, 1989) Ao mesmo tempo, a altura da nuvem diminui devido ao alargamento na lateral, provocado da difusão e turbulência auto-induzida. (CERC, 2002; BRITTER, 1989) Tal foi testemunhado nas experiências de Thorney Island por McQuaid (BRITTER, 1989), em que a dimensão da nuvem gerada a 200 m a de distância a jusante fonte, tinha cerca de 250 m de largura e apenas 3 m de altura. O aumento da nuvem na lateral como e a diminuição da altura, originam uma nuvem de pequena altura que ocupa uma grande extensão. (BRITTER, 1989)

As diferenças de massa volúmica entre a nuvem e o ar atmosférico, reduzem a mistura da nuvem com o ar envolvente, contudo, na grande área superficial da nuvem ocorre a mistura turbulenta com o ar ambiente, fenómeno denominado de *entrainment*, aumentando a diluição da nuvem no exterior (figura 4.3). (CERC, 2002)

4.2.3 Influência do terreno

O comportamento da nuvem de gás pesado nos estágios iniciais de dispersão, evidencia a importância da interacção com o terreno. O comportamento da nuvem é afectado pelos declives e irregularidades do terreno, bem como pela presença de obstáculos que inclusivamente podem alterar a direcção da deslocação da nuvem, através da sua canalização entre obstáculos, fenómeno observável em condições semelhantes à disposição de obstáculos de um ambiente urbano (BORREGO *et al.*, 1989). Sabe-se também que terrenos urbanos e suburbanos aumentam a dispersão de nuvens devido ao aumento de turbulência mecânica gerada pela rugosidade própria do terreno. (BORREGO *et al.*, 1990)

De acordo com Borrego *et al.* (BORREGO *et al.*, 1990) ao incluir a rugosidade na simulação numérica da dispersão de poluentes através de modelos Gaussianos, é possível detectar um pico de maior concentração mais próximo da fonte, assim como numa concentração ligeiramente inferior a maior distância da fonte. Assim, numa

região heterogénea, os efeitos da rugosidade do terreno na dispersão atmosférica são dominados pelas características físicas da área circundante da fonte (1 a 2 km). (BORREGO *et al*, 1990)

4.3 Tipos de simulação

A relevância de um modelo que permita simular a dispersão de uma libertação accidental de um material perigoso com comportamento de gás pesado é justificada pela necessidade de planear e precaver as consequências potencialmente catastróficas, típicas de uma libertação accidental de compostos com estas características. (RIGAS e SKLAVOUNOUS, 2004)

O estudo do comportamento de uma nuvem de gás pesado pode ser realizado de duas formas diferentes e complementares: a simulação numérica e física. A simulação numérica é conseguida através de algoritmos mais ou menos complexos que procuram descrever o comportamento da nuvem, concentrações e grandezas físicas. Estes, são do ponto de vista de avaliação de riscos os mais práticos. Contudo dependem directamente das simulações físicas para os processos de validação e calibração ou introduzir melhorias.

A simulação física à escala real ou reduzida é uma ferramenta importante do estudo e de grande utilidade ao modelador, permitindo, além de calibrar modelos, detectar fenómenos não previstos ou estudar um determinado fenómeno de forma isolada.

4.3.1 Modelação numérica

O desenvolvimento do conhecimento científico sobre o comportamento da nuvem de gás pesado tem contribuído para o desenvolvimento de diferentes tipos de modelos numéricos. De um modo geral, é possível distinguir três categorias de modelos numéricos:

- Modelos empíricos: têm por base a utilização da equação Gaussiana clássica para a previsão da dispersão atmosférica de gases. Numa primeira fase estas apenas consideravam a dispersão de gases passivos, sendo que a adaptação para gases pesados realizada através da modificação das considerações empíricas de parâmetros internos e da forma da nuvem nos primeiros estágios. A primeira geração de modelos surgiu em meados dos anos da década de 70.

- Modelos “Caixa”: estes modelos consideram grandes quantidades “integrais” ou “macroscópicas”, tendo em consideração a massa volúmica do gás. A maior parte dos modelos existentes considera a dispersão gravítica, integrando ainda a modelação de diferentes fenómenos, que representam vários princípios, como dinâmica de fluidos e relações empíricas obtidas experimentalmente. Na generalidade dos casos é frequente considerar uma primeira fase a dispersão gravítica, simulada como caixa acoplada a um modelo de dispersão Gaussiano. A fase gravítica permite considerar o efeito da diferença de massa volúmica entre a nuvem e o ar ambiente. Durante esta fase são considerados os efeitos da diluição da nuvem, do vento, da humidade, das transferências de energia na forma de calor bem como a rugosidade e topografia do terreno. As equações responsáveis por descrever os fenómenos que influenciam o comportamento da nuvem apresentam diferentes graus de complexidade. Existe uma grande vantagem em relação aos modelos de primeira geração que são a simplicidade, tempo reduzido de cálculo não considerando o aspecto estatístico. Apesar das vantagens, a precisão é, no entanto, limitada devido ao facto de a maioria dos resultados obtidos ser apenas da ordem de grandeza dos valores registados experimentalmente. Além disso os cenários escolhidos para o estudo normalmente são considerados “situações ideais”, isto é, em terreno plano com a presença de poucos obstáculos ou fontes de emissão variáveis ao longo do tempo.
- Modelos de equações de conservação: descrevem detalhadamente o campo de escoamento, incluindo a turbulência associada à dispersão da nuvem gasosa. Permitem descrever de forma detalhada os processos físicos envolvidos na dispersão da nuvem de gás pesado. Os processos de dispersão são descritos através das equações de conservação tridimensionais. As propriedades de interesse – concentração massa volúmica e velocidade - são expressas em função do espaço e do tempo, determinando-se a partir das equações de conservação de massa, quantidade de movimento energia e continuidade. O efeito da gravidade é incluído directamente nas equações. Estes modelos encontram-se frequentemente na forma de modelos computacionais da dinâmica de fluidos (CFD). Apesar da sua levada precisão de resposta e de ultrapassarem as limitações dos modelos de “caixa”, o tempo de cálculo é elevado, pelo que a sua implementação como sistema de resposta em situação de libertação accidental é ainda difícil. (RISCAV, 2007)

Adoptou-se um modelo “caixa” acoplado a um modelo Gaussiano, uma vez que satisfaz os objectivos pretendidos neste estudo. Este tipo de sistema permite simular o comportamento da nuvem gasosa nos primeiros instantes após a libertação, com um modelo de “caixa” e simulando depois da dispersão passiva, através de um modelo Gaussiano. A metodologia de cálculo permite assim calcular e obter resultados representativos da dispersão da nuvem nos diferentes estágios característicos do comportamento da nuvem.

4.3.2 Modelação Física

A modelação física é uma técnica particularmente atractiva para o estudo da dispersão de gases pesados, tendo sido conduzidos diversos estudos quer em escala real quer em escala reduzida (túnel de vento). (NIELSEN, 1998)

A simulação física em túnel de vento mostra potencial para a compreensão de uma vasta gama de fenómenos de dispersão complexos. A principal vantagem deste tipo de simulação física é a possibilidade de controlo das diversas variáveis, podendo, ao contrário de simulação à escala real, estudar o efeito particular de cada variável, determinando assim quais são os parâmetros que dominam os efeitos de dispersão e quais são os secundários.

Assim, diferentes influências como a geometria dos edifícios, dimensões das ruas, vegetação e rugosidade podem ser investigadas através de túnel de vento controlando cada parâmetro individualmente. (AHMAD, 2005)

4.4 Modelo RISCAV

Da necessidade de avaliação de risco de libertações acidentais de produtos químicos e de preparação das autoridades competentes à resposta a acidentes graves, foi desenvolvido um software de apoio à tomada de decisão o RISCAV.

O sistema resulta na tentativa de disponibilizar uma ferramenta de resposta que permita em situações de emergência estimar a possível extensão da área afectada pela libertação de um composto tóxico, explosivo ou inflamável. Tendo em conta estes objectivos é necessário o desenvolvimento de modelos numéricos relativamente simples e rápidos com possibilidade de melhoria contínua acompanhando a evolução informática.

4.4.1 Descrição sumária do RISCAV

A metodologia de simulação, integrada no sistema RISCAV, tem por suporte um conjunto de bases de dados de produtos químicos, cenários de acidente para a actividade e área em avaliação e informação meteorológica em constante actualização através da ligação a uma estação meteorológica.

As bases de dados de produto químicos e de cenários de acidente predefinidos, isto é, previamente identificados e caracterizados, possibilitam a um operador não especializado seleccionar uma situação próxima do eventual acidente e aceder directamente às características dos produtos químicos e respectivas condições de armazenamento.

4.4.2 Dados e entrada

Para que o modelo numérico de dispersão da nuvem de gases pesados na atmosfera, é necessário introduzir informação referente a condições de armazenamento, e tipo de libertação do produto assim como as condições atmosféricas observadas para o dia em questão. Este tipo de informação é dividido em três tipos de categorias

- Base de dados meteorológicos;
- Base de dados de produtos químicos perigosos;
- Base de dados de cenários de acidentes a definir ou mais prováveis.

4.4.3 Base de dados Meteorológicos

A informação meteorológica necessária é introduzida no programa RISCAV e pode ter origem em qualquer estação meteorológica.

4.4.4 Base de dados de tipos de acidentes

O RISCAV possui actualmente três tipos de cenários diferentes:

- Colapso total dum depósito
- Fuga num depósito
- Ruptura total duma tubagem

O tipo de acidente está de certa forma condicionado em relação ao estado físico dos produtos libertados, visto que este factor influencia grandemente a duração e a quantidade de produto libertada para a atmosfera não esquecendo as características intrínsecas ao produto.

4.4.5 Software de simulação

A primeira versão do RISCAV foi desenvolvida pela Universidade de Aveiro. O desenvolvimento deste sistema teve início em 1989 (LEITÃO *et al.*, 1989), foi melhorado até meados da década de 90 (MARTINS *et al.*, 1996), tendo sido actualizado até recentemente (TAVARES *et al.*, 2007). O sistema integra um modelo de “caixa” baseado no modelo EFFECTS v 1.2 (TNO, 1987) que utiliza as metodologias de cálculo apresentadas posteriormente em “*Methods for the calculation of the physical effects of the escape of dangerous material*”, vulgarmente conhecido por *Yellow Book* (TNO, 1989). O modelo de dispersão de nuvem de gás foi desenvolvido no DAO. (LEITÃO *et al.*, 1989, MARTINS *et al.*, 1996) Os modelos numéricos que constituem o sistema, simulam três processos principais:

- Identificação do tipo de armazenamento;
- Libertação e respectivo tipo de emissão;
- Dispersão da nuvem de gás tóxico.

A dispersão divide-se numa fase gravítica, em especial para gases pesados, em que predomina a diferença de massa volúmica entre o gás e o ar ambiente, e a fase de dispersão passiva. Para gases explosivos ou inflamáveis, esta ultima fase, geralmente não apresenta perigosidade, sendo apenas considerados os eventuais efeitos tóxicos.

Dos modelos existentes no sistema, as metodologias foram organizadas baseando-se nas diferentes etapas de dispersão da nuvem de gases pesados em função do tipo de efeitos que queremos estudar. Assim, os modelos numéricos presentes no RISCAV são apresentados na Tabela 4.1, abaixo.

Tabela 4.1 Correspondência de cada tipo de modelo.

TIPO	MODELOS
Emissão	Modelo de emissão
Dispersão atmosférica	Modelo hidrostático Modelo Gaussiano
Efeitos	Radiação Explosão Concentração (dispersão)

4.4.5.1 Emissão – Modelo de Emissão

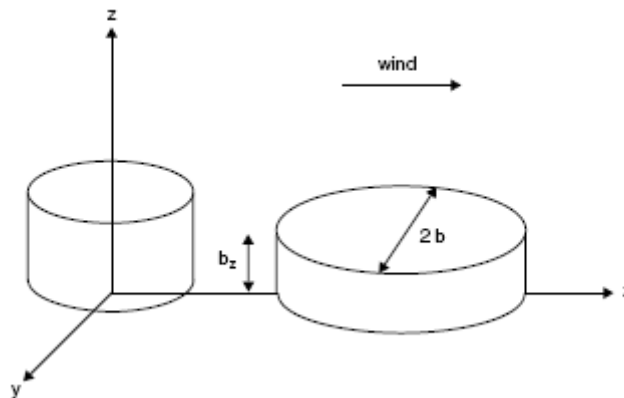
A caracterização do acidente é um dos principais factores críticos na definição da taxa de emissão de um gás para a atmosfera (ZEREFOS *et al.*, 1988) e no desempenho do sistema. A descrição do local do acidente inclui a identificação do depósito acidentado ou do produto químico libertado; a massa armazenada e/ou libertada; e o tipo de acidente, seja o colapso do depósito, de uma tubagem ou de uma válvula, permitindo a libertação instantânea da totalidade da massa armazenada, ou uma libertação de maior duração (duração finita) quando se dá através dum orifício. De acordo com a descrição do acidente é possível deduzir o estado físico, pressão e temperatura do produto químico libertado; a informação sobre o tipo de revestimento do solo na zona do acidente e a existência ou não de bacia de retenção é também necessária. Dependendo das condições de temperatura e pressão de armazenamento ou transporte, o produto pode ser libertado na fase gasosa ou na fase líquida vaporizando em seguida, ou ainda como uma mistura das duas fases.

O modelo permite também fazer simulações de derrame e vaporização incluindo também o derrame a partir de recipientes refrigerados ou pressurizados. Através dos dados acima descritos e da informação meteorológica é estimada a taxa de emissão de gás ao longo do tempo (TNO 1997 e 2005), organizada em intervalos de tempo de emissão constantes para efeito de cálculo numérico.

A caracterização do acidente pode ser armazenada em bases de dados, sob a forma de cenários predefinidos para cada tipo de situação, com o objectivo de reduzir o tempo de resposta e o erro devido a falha humana na transmissão e introdução de dados. (TAVARES *et al.*, 2007)

4.4.5.2 Dispersão atmosférica

A dispersão atmosférica da nuvem é simulada através de um modelo “caixa” durante a fase gravítica seguida da simulação através de um modelo Gaussiano depois de passar para a fase de dispersão passiva. Durante a fase gravítica a nuvem apresenta uma forma aproximadamente cilíndrica (Figura 4.3), que se expande radialmente, diminuindo a altura e mantém a massa. (PIKNETT, 1981)



4.3 Representação utilizada nos modelos de caixa sobre a forma cilíndrica da nuvem de gás pesado durante a fase gravítica e relação entre a altura e o diâmetro da nuvem.

(fonte: TNO, 2005, pp.374)

O modelo utilizado para a simulação da fase gravítica foi o modelo hidrostático (Equação 4.2). (KAISER e WALKER, 1978), (CHLORINE INSTITUTE PAMPHLET, 1982), (ZEREFOS, 1988) Este modelo é orientado pela equação 4.3, a qual possibilita criar uma relação entre a velocidade à qual a nuvem se expande de forma radial e a diferença da massa volúmica no interior da nuvem e o ar circundante.

$$U_f(r) = c \left\{ \frac{[b_z g(\rho - \rho_{ar})]}{\rho} \right\} \quad \text{Equação 4.1}$$

Sendo que:

U_f = Velocidade de avanço da frente da nuvem

r = Raio da nuvem

ρ e ρ_{ar} = massa volúmica da nuvem e do ar respectivamente

b_z = Altura da nuvem

c = constante de proporcionalidade (≈ 1)

Em que:

$$r = 2 * b_z$$

A transição de fase gravítica para a passiva é resultado da influência da força gravítica. Neste modelo foi utilizado o critério definido por Germeles e Drake (ZEREFOS, 1988), para determinar o final da fase gravítica, que é no momento em que a velocidade de avanço da nuvem iguala a velocidade do vento ($U_f = u$).

No instante que a fase gravítica acaba, a dispersão da nuvem passa a ser descrita pelo modelo Gaussiano. Através deste tipo de modelos pode determinar-se a concentração num ponto qualquer num sistema de coordenadas do tipo (x,y,z), em que o ponto de origem é a fonte emissora, no eixo (x) a velocidade do vento, no eixo (y) perpendicular a velocidade do vento e no eixo (z) as cotas (altura).

Para que o modelo se ajuste às condições em que a nuvem se dispersa é necessário acoplar um modelo hidrostático a um modelo Gaussiano (LEITÃO *et al.*, 1990). Para isso utiliza-se o método de Turner (1969) para fontes em área, em que se calculam as coordenadas duma fonte virtual e se determina a origem virtual de uma fonte de gás neutro que teria, no local, a dimensão equivalente às da nuvem de gás pesado no final da fase gravítica (LEITÃO *et al.*, 1989 e 1990). Quando está definida a fonte virtual, é simulada a dispersão da nuvem de gás pesado, para que isto seja possível, considera-se uma sucessão de libertações contínuas de muito curta duração. O sistema posteriormente integra a correcção da equação Gaussiana aproximando-a para o caso de fontes de curta duração (PALAZZI *et al.*, 1982), considerando que a fonte se extingue antes do momento de observação para poder proceder ao cálculo da concentração corrigida.

A equação utilizada para determinar a concentração durante a dispersão gravítica encontra-se fortemente dependente do estado da fonte emissora, podendo considerar dois tipos de equações:

Quando a fonte ainda se encontra activa, a concentração é dada por:

$$C = \frac{1}{2} C_g(x, y, z) \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{x}{\sqrt{2}\sigma_x} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{(x-ut)}{\sqrt{2}\sigma_x} \right] \right\} \quad \text{Equação 4.2}$$

Caso a fonte de emissão se encontre já extinta:

$$C = \frac{1}{2} C_g(x, y, z) \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{x - u(t - tr)}{\sqrt{2}\sigma_x} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{(x-ut)}{\sqrt{2}\sigma_x} \right] \right\} \quad \text{Equação 4.3}$$

Sendo que:

C_g = concentração calculada pela equação Gaussiana clássica

(x,y,z) = Coordenadas espaciais

t = Tempo de observação

tr = Tempo de vida da fonte

σ_x = Coeficiente de dispersão Gaussiana

A concentração num determinado ponto é dada pelo somatório das concentrações nesse mesmo ponto, em cada instante, resultantes do contributo das diferentes fontes emissoras ao longo do tempo (Leitão *et al.*, 1989), calculadas pelas equações 4.3 e 4.4.

A simulação com estes modelos de dispersão tem vindo a ser validada por comparação com alguns resultados experimentais à escala real, para libertações instantâneas e contínuas. (HANNA *et al.*, 1991; MCBRIDE *et al.*, 2001; RIGAS e SKLAVOUNOS, 2004; (SKLAVOUNOS e RIGAS, 2006)

4.4.5.3 Efeitos

Os níveis de concentração e consequentes efeitos de toxicidade ou limite de inflamabilidade são determinados através dos modelos de dispersão acima descritos, quanto aos efeitos provenientes duma eventual ocorrência de incêndio ou explosão são determinados através dos modelos de radiação e pressão respectivamente. Os modelos que integram o RISCAV, têm por base as metodologias de cálculo apresentadas no *Yellow Book*. (TNO, 1997, 2005).

Aquando da ignição de substâncias inflamáveis e consequente combustão são libertadas quantidades de energia através da atmosfera que serão levadas até a um receptor. Numa situação de incêndio da substância derramada é calculado o fluxo térmico transmitido, que depende da potência da fonte, determinada com base nas características inerentes á substância, quantidades derramadas e à distância a que se encontra do receptor. Este tipo de efeitos depende também das características da atmosfera como a humidade e temperatura. As situações possíveis de simulação neste modelo são uma bola de fogo “fireball” ou formação de lagos de fogo “pool fires”. Os resultados de saída são apresentados em linhas de iso–dano, representando as intensidades de radiação térmica originadas pelo incêndio.

Por outro lado, no caso de libertação de substâncias inflamáveis, com forma de nuvem, e posterior contacto com uma fonte de ignição, pode haver uma explosão e com a consequente formação formação duma onda de pressão. A metodologia de cálculo permite analisar explosões de nuvens de vapor não confinadas (UVCE, *Unconfined Vapour Cloud Explosion*). As isolinhas são representadas de forma semelhante ao caso de incêndio, linhas de iso–dano, determinadas a partir das ondas de pressão geradas por explosões equivalentes de TNT. (TNO, 1992).

4.4.6 Descrição do funcionamento do RISCAV

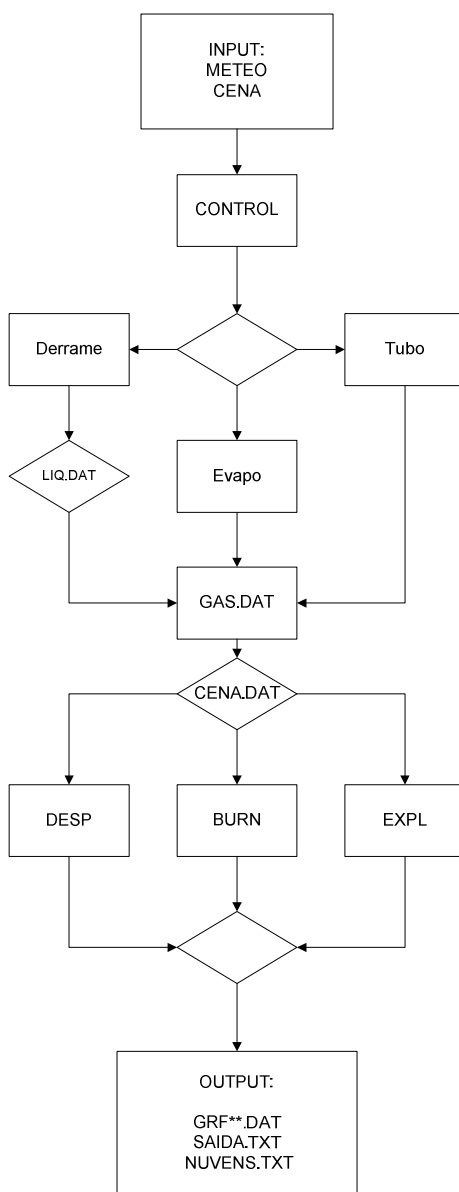


Figura 4.4 Esquema de funcionamento do software RISCAV

Numa primeira fase o sistema analisa através do ficheiro executável (CONTROL) a informação de entrada (CENA.DAT e METEO.DAT). Seguidamente, prossegue o cálculo para a modelação das condições de emissão (DERR, EVAPO, ou TUBO), em função da informação de entrada e ficha do produto criando a um ficheiro (GAS.DAT), que permite a transição de informação para os módulos seguintes. Em situações de derrame o sistema cria um ficheiro LIQ.DAT que, tal como o ficheiro GAS.DAT, permite transitar informação para os módulos seguintes. Finalmente, analisando

novamente o ficheiro de entrada (CENA.DAT) o sistema identifica o tipo de efeito que se pretende avaliar (DESP, BURN ou EXPL). Por último, para a determinação dos efeitos pretendidos, o sistema gera ficheiros de saída GRF**.DAT, NUVENS.TXT e SAIDA.TXT, em que os dois últimos são criados exclusivamente para toxicidade e inflamabilidade (Borrego *et al*, 2007).

4.4.7 Validação do modelo RISCAV por comparação com resultados experimentais à escala real

Para avaliar o desempenho do RISCAV fez-se uma análise comparativa com os resultados obtidos nos ensaios experimentais Burro 2 e Burro 9, ensaios estes que têm sido amplamente utilizados na avaliação de desempenho de modelos numéricos. Os ensaios experimentais abaixo descritos consideram produtos químicos armazenados que depois de liberados se comportam como gás pesado. Os ensaios BURRO (KOOPMAN *et al.*, 1982 e 1988.) foram realizados pelo *Department of energy* e pelo *Lawrence Livermore National Laboratory* na *China Lake*, Califórnia 1980 consistindo em grandes libertações de gás natural sob diferentes condições meteorológicas.

Existe actualmente uma grande variedade de bases de dados onde informação detalhada dos ensaios está estes estão disponíveis, sendo que a base de dados utilizada no presente estudo foi a *Rediphem* (NIELSEN, 1998). Da informação disponível seleccionou-se apenas aquela referente aos registos obtidos mais próximo do solo, para que seja possível a comparação com os resultados do RISCAV.

Esta validação teve dois tipos de análise, uma análise qualitativa em relação aos gráficos apresentados e quantitativa com base em parâmetros estatísticos abordada na seguinte.

O ensaio BURRO 2 consistiu na libertação de uma massa total de 15296,60 kg de gás natural, armazenado a uma temperatura de -161°C durante 167 segundos a um caudal constante de cerca de 88 kg.s⁻¹. Durante o ensaio registou-se os seguintes parâmetros:

Temperatura ambiente: 37,30 °C; Velocidade do vento: 5,4 m.s⁻¹; Humidade relativa: 57,1%; Classe de estabilidade atmosférica: C

Na figura 4.5, está representada graficamente a variação temporal das concentrações máximas de gás natural em mg.m^{-3} simuladas e registadas durante os primeiros 500 segundos para o ensaio BURRO 2.

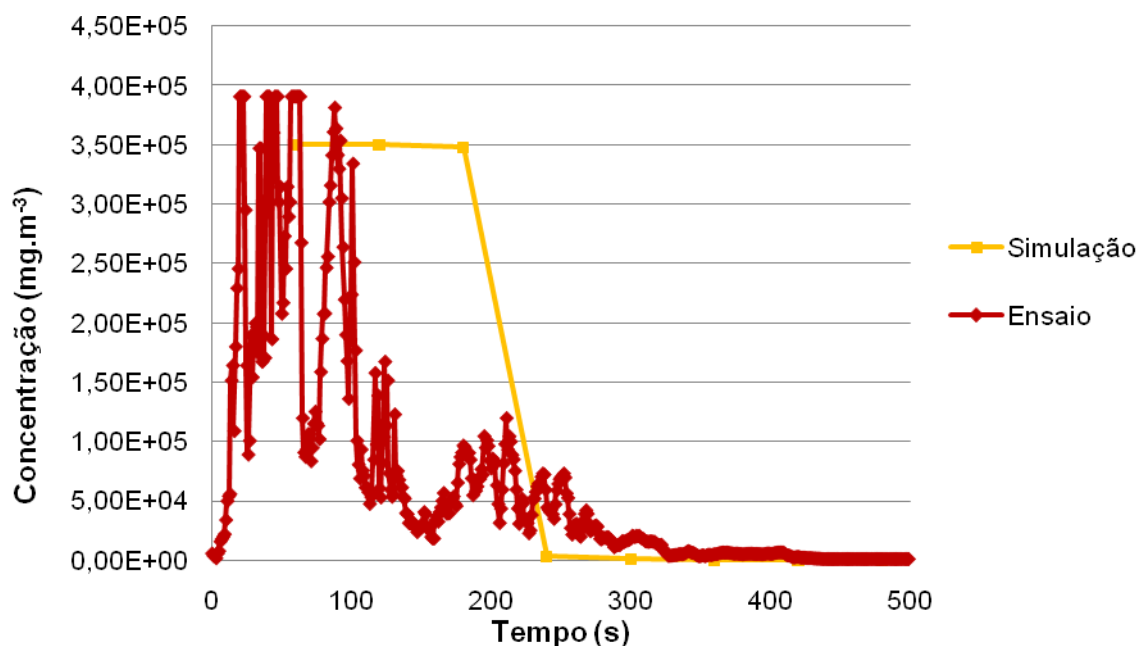


Figura 4.5 Gráfico comparativo da evolução temporal para o período de simulação das concentrações máximas de Gás Natural estimadas pelo RISCAV e registadas no ensaio experimental BURRO 2.

Da análise da evolução das curvas de concentração, foi possível verificar que durante os primeiros 100 segundos, os valores de concentração máximos simulados são semelhantes aos registados, contudo durante o período de tempo compreendido entre os 100 e 200 segundos, o RISCAV sobrestima os valores de concentração máxima e, por último a partir dos 300 segundos constata-se uma tendência de aproximação aos valores experimentais. Os valores sobrestimados no período de tempo compreendido entre 100 e 200 segundos podem resultar da aproximação no decorrer da fase gravítica. Dado que o sistema prevê a formação da nuvem a partir dos 300 segundos (5 minutos), a Figura 4.6 apresenta a variação temporal das concentrações máximas medida e simulada para o período de tempo compreendido entre 300 a 500 segundos após o início da libertação.

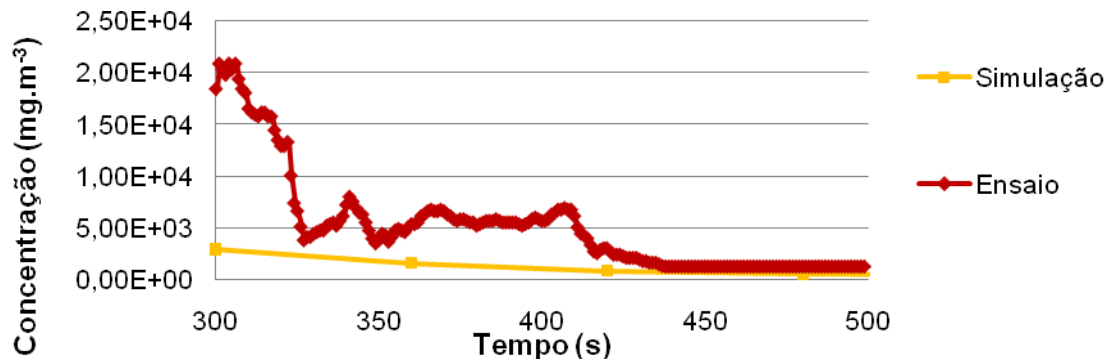


Figura 4.6 Gráfico comparativo da evolução temporal para o período compreendido entre 300 e 500 segundos após o início da libertação das concentrações máximas de Gás Natural estimadas pelo RISCAV e registadas no ensaio experimental BURRO 2.

Atendendo ao pormenor da evolução temporal das concentrações máximas, foi possível observar uma clara tendência de aproximação dos valores simulados para os valores obtidos experimentalmente, neste caso, a partir dos 420 segundos após a libertação. A subestimativa dos valores simulados entre os 300 e os 420 resulta principalmente da sobrestimativa identificada anteriormente. Embora as diferenças entre valores simulados e medidos nos primeiros instantes após a libertação, foi possível verificar uma importante tendência de aproximação aos valores medidos experimentalmente ao longo do tempo.

O ensaio BURRO 9 consistiu na libertação de uma massa total de 10774,00 kg de Gás Natural, armazenado a uma temperatura de -161°C , durante 79 segundos a um caudal contante de cerca de 136 kg.s^{-1} . Durante o ensaio registou-se uma temperatura de $35,4^{\circ}\text{C}$; velocidade do vento de $5,7 \text{ m.s}^{-1}$; e um valor de humidade relativa de 64,4% e classe de estabilidade atmosférica D.

Na figura 4.7 é apresentada a evolução temporal das concentrações máximas no interior da nuvem durante os primeiros 280 segundos após o início da libertação. Como é possível observar no estudo anterior os valores de concentração só foram possíveis de simular depois de 60 segundos após, uma vez que o sistema de cálculo tem como primeiro passo o cálculo de concentrações no minuto seguinte à libertação simulada.

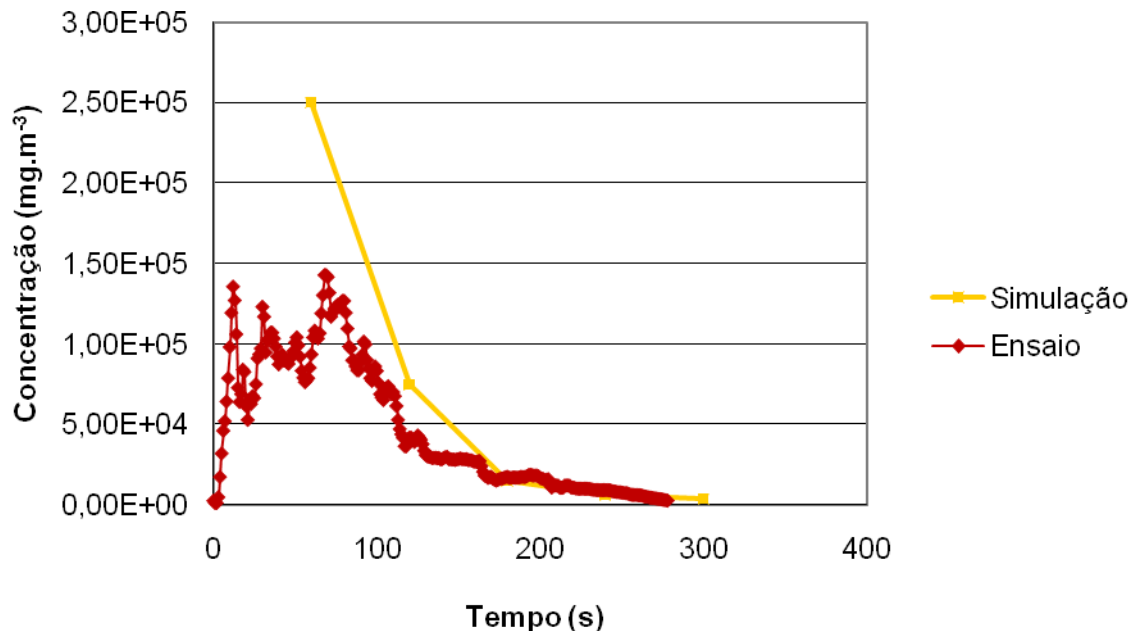


Figura 4.7 Gráfico comparativo da evolução temporal para o período de simulação das concentrações máximas de Gás Natural estimadas pelo RISCAV e registadas no ensaio experimental BURRO 9.

Analisando a figura acima observou-se que os valores simulados estão acima dos obtidos aos do ensaio experimentalmente, em que durante os 150 segundos apesar de acompanhar a tendência da concentração medida experimentalmente sobrestima esses mesmos valores. Após os 150 segundos os valores de concentração simulados são muito semelhantes aos valores experimentais. Para que a análise seja mais precisa limitou-se o tempo no intervalo entre 100 e 280 minutos. (Figura 4.8)

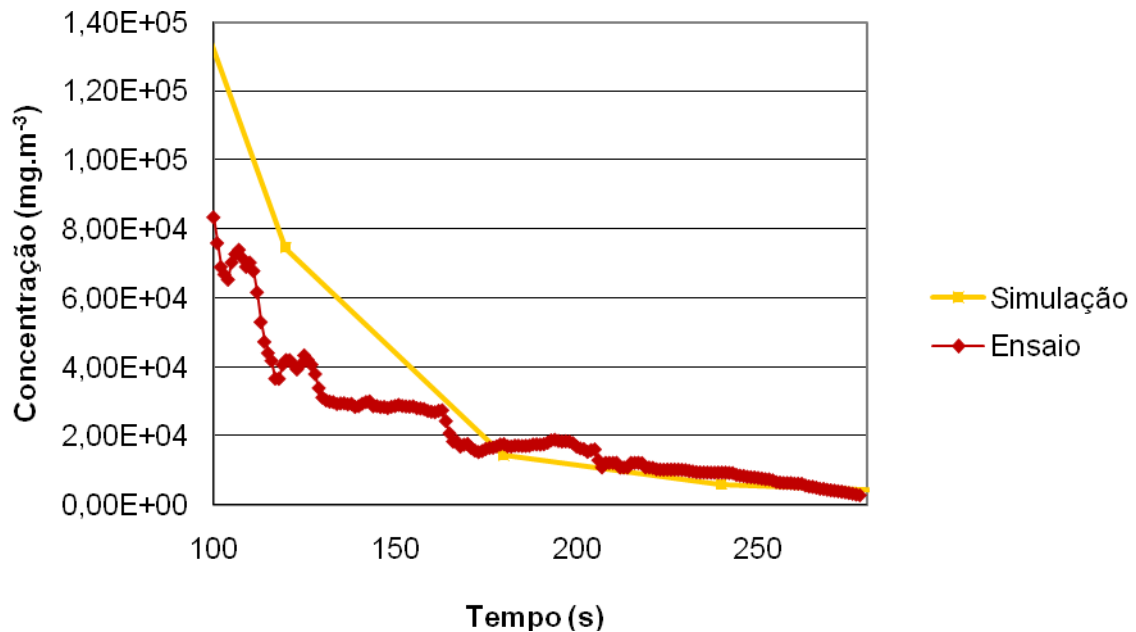


Figura 4.8 Gráfico comparativo da evolução temporal para o período compreendido entre 300 e 500 segundos após o início da libertação das concentrações máximas de Gás Natural estimadas pelo RISCAV e registadas no ensaio experimental BURRO 9.

Da observação da figura anterior verificou-se novamente, que o sistema sobrestima os valores de concentração durante os primeiros momentos da libertação, no decorrer da fase gravítica, sendo que após a transição para a fase de dispersão passiva, os valores de concentração simulados aproximam-se tendencialmente para os valores obtidos experimentalmente. É também possível observar uma grande proximidade a partir dos 160 segundos, entre os valores simulados e os experimentais.

Dos ensaios experimentais expostos acima, constatou-se que o RISCAV sobrestima os níveis de concentração máxima durante os primeiros instantes logo após a libertação. Este comportamento é resultado dum conjunto de aproximações consideradas, no modelo hidrostático, que pretende recriar a fase gravítica da nuvem. Na fase seguinte quando se dá a diluição, e transita para uma aproximação da fase passiva, a tendência dos valores do RISCAV é aproximar-se dos valores experimentais. Com base no estudo qualitativo realizado, foi possível concluir que o RISCAV origina valores válidos e aceitáveis para ambos os ensaios, assim numa primeira análise este é capaz de simular diferentes situações de simulação accidental.

4.4.8 Avaliação do desempenho do sistema RISCAV

Além da análise qualitativa apresentada anteriormente, o desempenho do sistema foi avaliado através duma análise quantitativa dos mesmos ensaios. Para proceder a esta análise é necessária a avaliar alguns parâmetros estatísticos, que são essenciais para a validação de modelos como o RISCAV, em que são possíveis de calcular através da ferramenta BOOT 2 (CHANG e HANNA, 2005). Esta ferramenta é um software que permite avaliar estatisticamente os resultados fornecidos por modelos numéricos. A avaliação estatística do desempenho do modelo numérico é feita através da comparação dos resultados dos modelos com determinados estados de referência, geralmente observações. As observações podem ser obtidas através de medições experimentais, ou ser resultado de outros modelos ou procedimentos de análise. As simulações obtidas para os dois testes (BURRO 2 e BURRO 9), foram comparadas através de três parâmetros estatísticos que são:

- *Normalized Mean Square Error* (NMSE) – erro médio quadrado normalizado;
- *Fractional of prediction with factor of 2* - (factor de previsão com um factor 2);
- *Factorial BIAS* (FB) - (fracção media de ponderação).

$$NMSE = \frac{\overline{(C_0 - C_p)^2}}{\overline{C_0} \overline{C_p}} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

$$FB = \frac{(\overline{C_0} - \overline{C_p})}{(\overline{C_0} + \overline{C_p})} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

$$FAC2 = \text{fraction of data that satisfy } 0.5 \leq \frac{C_p}{C_0} \leq 2.0 \quad (\text{Eq. 4.6})$$

onde C_p e $\overline{C_p}$ são valores modelados em cada ponto e sua média, respectivamente. C_0 e $\overline{C_0}$ são medidos experimentalmente em cada ponto e sua média, respectivamente (CHANG e HANNA, 2005).

Tabela 4.2 Parâmetros estatísticos calculados para os ensaios modelados pelo RISCAV para BURRO 2 e BURRO 9

Parâmetro	BURRO 2	BURRO 9	Referencia	Gama de valores aceitáveis
NMSE	1.01	0.14	0.00	< 1.5
FAC2	0.861	0.75	1.00	> 0.5
FB	0.498	0.30	0.00	< 0.3

Os valores do NMSE para as duas simulações estão dentro da gama de valores aceitáveis, embora que a simulação para o BURRO 2 seja mais elevado do que para a simulação BURRO 9, visto o valor de referência ser 0. No caso do FAC2 estão os dois dentro da gama, contudo mais próximos do que no teste anterior. Por último para o FB apenas o BURRO 2 está acima do valor aceitável, no entanto o BURRO 9 esteja no limite de aceitabilidade. Em suma todos os valores obtidos estatisticamente parecem estar dentro da gama de valores aceitáveis, com a excepção do FB que é consideravelmente maior para o ensaio BURRO 2. Baseado nos resultados obtidos é possível concluir que o RISCAV fornece resultados fiáveis e com resultados da modelação bastante aceitáveis em relação aos resultados experimentais (TAVARES *et al* 2008).

Da análise qualitativa dos gráficos e da análise quantitativa em relação aos parâmetros estatísticos avaliados é possível afirmar que o software RISCAV produz resultados fiáveis para a análise de libertações acidentais de gases pesados.

5 Caso de Estudo

Os estabelecimentos industriais de perigosidade superior definidos pelo Decreto de lei 164/2001, de 23 de Maio, e regulamentados pelo Decreto de Lei 254/2007, de 12 de Julho, são uma possível fonte de perigo, e que gera uma preocupação acrescida por parte de populações e autoridades. Um dos maiores aglomerados de indústrias químicas em Portugal é situado no distrito de Aveiro, o Complexo Químico de Estarreja (CQE). O caso de estudo centra-se essencialmente nas indústrias do CQE, sendo que são manuseados produtos potencialmente perigosos para a saúde humana e ambiente em caso de libertação accidental dum composto químico tóxico. Embora haja outros locais, em Portugal, importantes em termos de riscos industriais, é pela proximidade à Universidade de Aveiro, também o papel importante que estas indústrias têm no distrito, mais propriamente em Estarreja, bem como a possível urbanização nas zonas próximas ao CQE e a proximidade de zonas ambientalmente sensíveis como a Ria de Aveiro que pesaram na escolha do caso de estudo.

5.1 Caracterização concelho de Estarreja

O concelho de Estarreja pertence ao distrito de Aveiro, constitui parte integrante da Sub-região do Baixo Vouga, localizando-se na zona Litoral da Região Centro. Estarreja é um concelho com 108,2 km² que se distribui por 7 freguesias: Avanca, Beduído, Canelas, Fermelã, Pardilhó, Salreu e Veiros. O concelho é limitado geograficamente pelos concelhos de Albergaria-a-Velha, Oliveira de Azeméis, Murtosa e Ovar.

Segundo os dados estatísticos de 2001 residiam no concelho de Estarreja 28 182 habitantes, correspondendo a uma densidade populacional de 260,4 Hab. Km⁻². A população residente encontra-se maioritariamente fixada ao longo do principal eixo viário, EN 109, que atravessa longitudinalmente o concelho, no sentido Norte-Sul.

Ao comparar-se os dados de 1991 com os de 2001 foi possível constatar que houve um aumento da população residente em Estarreja.

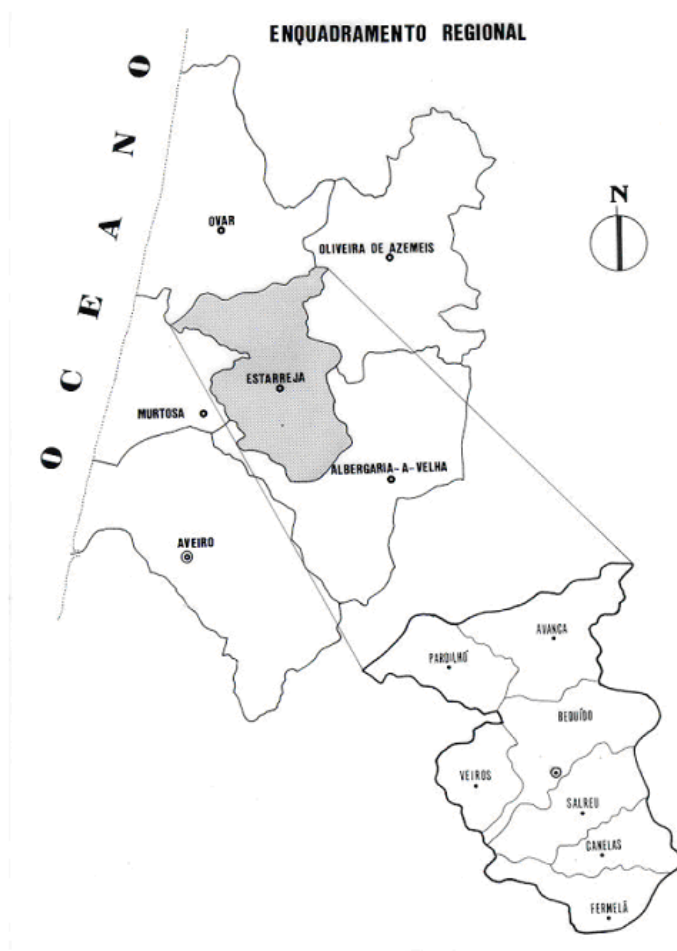


Figura 5.1 Mapa do distrito de Aveiro destacando concelho de Estarreja dividido por freguesias. (URL 9)

Tabela 5.1 Distribuição da população do concelho de Estarreja por freguesia (URL 9).

Freguesias	Área (Km ²)	População residente		Densidade populacional (hab.km ⁻²) 2001
		1991	2001	
Avanca	21,5	6426	6474	301,1
Beduído	20,2	6731	7794	385,8
Canelas	10,2	1498	1486	145,7
Fermelã	13	1580	1482	114,0
Pardilhó	15,9	4234	4175	262,6
Salreu	16,2	4157	4153	256,3
Veiros	11,2	2116	2618	233,7
Concelho	108,2	26742	28182	260,4

5.1.1 Parâmetros meteorológicos

Na região de Aveiro, existem duas torres meteorológicas, Avanca e Aveiro, onde podem ser retirados dados para a caracterização destes parâmetros. Numa fase inicial previu-se a utilização dos dados meteorológicos da estação de Avanca, por se localizar próximo do CQE. Contudo, a qualidade dos dados não é suficiente para o estudo, e optou-se pela estação meteorológica de Aveiro com melhor qualidade de dados.

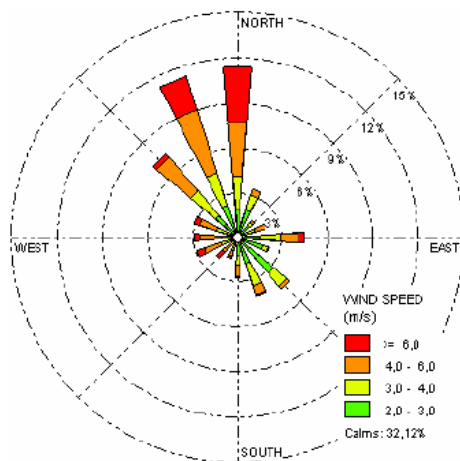


Figura 5.2 Rosa-dos-ventos de Estarreja aos 10 m, para os dados horários referentes a 2005

Assim, a estação meteorológica automática (EMA) localizada no Campus da Universidade de Aveiro (UA), tornou-se na alternativa, considerando que esta permite obter dados que representam satisfatoriamente as condições nas proximidades do CQE.

Foram analisados os dados referentes ao ano de 2005, com aquisição de valores em intervalos de 10 minutos. Por questões de tratamento de dados, estes foram transformados para médias horárias com eficiência de dados de 98.97 %.

A partir dos dados dos sensores colocados a 10 m de altura, foram obtidos valores de temperatura média anual de 15°C e humidade relativa 77 %. Não tendo sido possível analisar dados de pressão atmosférica, assume-se como valor de pressão atmosférica normal, 101325 Pa.

Quanto às direcções predominantes do vento, com velocidade média anual 3 m.s⁻¹, é possível verificar que é dos quadrantes norte e noroeste que estes os mais frequentes Figura 5.2. Foi também determinada a frequência de ocorrência das classes de estabilidade atmosférica de *Pasquill-Gifford*. Para tal recorreu-se aos critérios

apresentados no Tabela 5.2, adaptados de (Domingos, J.J.D., 1980). Os resultados são apresentados na Figura 5.3.

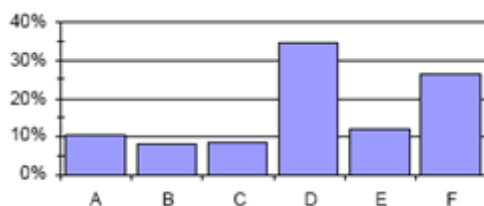


Figura 5.3 Frequência de Classes de estabilidade atmosférica em Estarreja

Tabela 5.2 Estabilidade atmosférica em função da intensidade do vento.

(m.s ⁻¹)	Dia	Noite
$v < 2$	A	F
$2 \leq v \leq 3$	B	E
$3 < v \leq 3$	C	D
$4 < v \leq 6$	D	D
> 6	D	D

Os dados meteorológicos apresentados na tabela 5.3 referentes a Estarreja foram utilizados no estudo (ERASE, 2000), cujos parâmetros utilizados avaliados foram:

Tabela 5.3 Dados meteorológicos pela AMRia (ERASE, 2000).

Regime de Ventos (médias anuais)		
Rumo	Frequência (%)	Velocidade Média (m.s ⁻¹)
N	27,2	5,06
NE	2,9	3,56
E	5,4	3,67
SE	8	4,42
S	9	6,25
SW	7,5	6,03
W	8,1	4,53
NW	15,5	5,17
S. Jacinto 1954/80		
Temperatura do ar média anual (°C)	13,9	Estarreja - 1956/70
Humidade relativa do ar média anual para 9h	80%	Estarreja - 1956/77
Nebulosidade Total média anual [0-10]	5	Estarreja - 1956/77

5.2 Caracterização do CQE

A indústria química surge em Estarreja na década de trinta do século passado com a instalação duma unidade de produção de Cloro e soda da empresa Sapeç. Posteriormente após a II Guerra Mundial, com o início da produção de amoníaco em Portugal, que Estarreja surgiu como um dos mais importantes pólos da indústria química portuguesa.

A produção de amoníaco iniciada em Fevereiro de 1952, visava o abastecimento de adubos nitro-amoniacaais à Agricultura Portuguesa, para aumentar a sua produtividade. De facto a produção de amoníaco acaba por ajudar a viabilizar os grandes investimentos, do então designado “Plano Hidroeléctrico Nacional”, na construção de grandes hidroeléctricas, devido às quantidades apreciáveis de energia necessárias à obtenção de hidrogénio por hidrólise sendo localizada estrategicamente adjacente à linha de caminhos de ferro permitindo fácil transporte de matérias-primas e expedição de produtos finais. Estava pois criada a primeira fase do Complexo Químico de Estarreja, como grande plataforma produtiva da Indústria Química ao serviço da Economia de Portugal.

Em 1979 arranca a unidade de produção de anilina, que permitiu consolidar e viabilizar um grande número de instalações e de logística existentes, contudo a viabilidade económica da produção de anilina não estava assegurada.

Em 1982, há o arranque da unidade de Metil-di-Isocianato (MDI) que estabilizou em termos empresariais o CQE. O MDI é um dos principais componentes no fabrico de poliuretanos, polímero com numerosas aplicações em diversas indústrias, nomeadamente automóvel e de embalagens. É neste ano dá-se a Quimigal é privatizada e passa em conjunto com a Uniteca, a integrar a holding industrial CUF.

Foi estabelecido um contrato adicional de fornecimento de anilina, de Cloro e de soda com a DOW, que em conjunto com o aumento de produção de hidrogénio e de monóxido de carbono da Ar Líquido permite uma forte expansão de toda a fileira de poliuretanos de Estarreja, que se converte numa estrutura dinâmica com importantes influências noutras unidades de indústria petroquímica e de refinação noutras plataformas industriais.

Os principais produtos actualmente produzidos no CQE são o Styrofoam (placas de espuma rígida de poliestireno extrudido para isolamento térmico) e MDI (um dos tipos de isocianato polímero) na DOW; hidrogénio, monóxido de carbono, dióxido de carbono, azoto, oxigénio, árgon e ar comprimido no Ar Líquido; resinas de policloreto

de vinilo- PVC na Cires; Cloro, amoníaco, anilina e sais de alumínio na CUF (Ordem dos Engenheiros, 2005).

As empresas DOW, Ar Líquido e CUF, encontram-se actualmente em processo de expansão, com o aumento da capacidade produtiva, ajustes a nível de processos, aumento ao nível de segurança, substituição da tecnologia e matérias-primas. A DOW irá ser expandida em 65% da capacidade nominal, alterando diversas unidades da fábrica ao nível de equipamento e tubagens em geral, uma contenção secundária nas unidades de manuseamento de Fosgénio vai ser instalada aumentando assim a segurança (IDAD, 2007a). No que diz respeito ao Ar Líquido, prevê-se uma nova unidade de H₂/CO que tem como objectivo reduzir as necessidades de CO e de H₂ por parte da DOW e da CUF. Quanto à CUF, será instalada uma nova fábrica de ácido nítrico, aumento da capacidade de produção da fábrica de nitrobenzeno, da produção de anilina e instalação de uma unidade de recuperação de ciclo-hexanol, estas mudanças no sector de Produção de Anilina e Derivados (PAD). Já no sector de Produção de Cloro-Álcalis, prevê-se o aumento da capacidade da fábrica de HCl, instalação de uma unidade de liquefacção de Cloro e alteração da actual fábrica de hipoclorito de sódio (IDAD, 2007b).

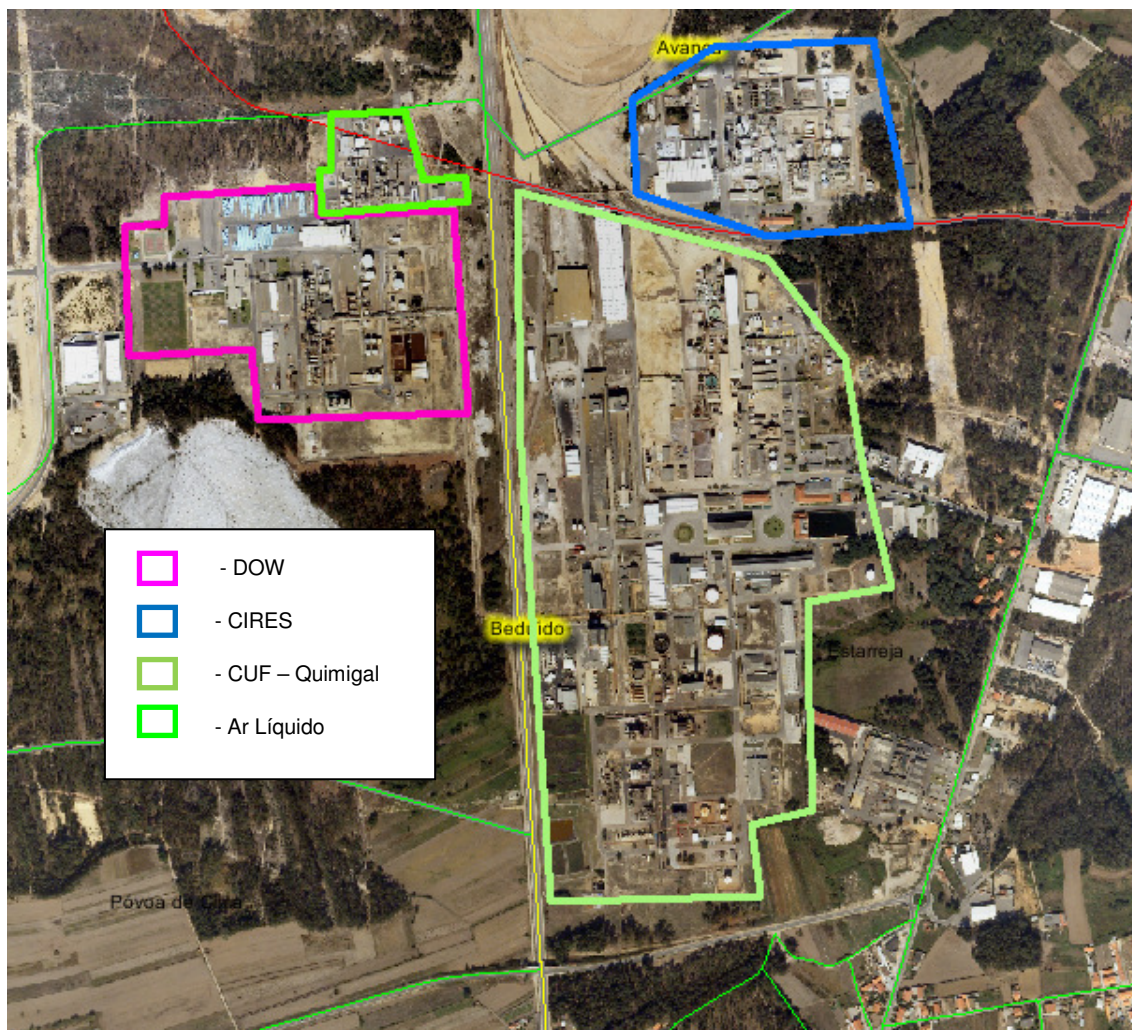


Figura 5.4 – As principais indústrias presentes no Complexo Químico de Estarreja (URL 10)

5.3 Análise de Risco

A análise de risco efectuada insere-se no âmbito do quadro normativo vigente para a prevenção de acidentes industriais graves e limitação das suas consequências passíveis de serem sentidas no exterior da unidade industrial, no âmbito das Directivas Seveso I e II.

Existem diferentes pontos onde o risco de acidente é mais elevado em relação a outros, é nas consequências desses acidentes que o presente trabalho se tenta focar, essencialmente, acidentes em que resultam numa libertação accidental de gás pesado tóxico, visto que, o potencial de dano em termos de área afectada é máximo para cenários de acidente deste tipo (KHAN e ABBASI, 1999).

Deste modo, não serão objecto de análise os riscos referentes à exposição ocupacional, os acidentes de pequena magnitude, cujos efeitos previsíveis se encontrem confinados ao estabelecimento industrial, os riscos decorrente de emissões de efluentes e resíduos resultantes da normal actividade da unidade os emissões fugitivas.

A metodologia de análise de risco baseia-se principalmente em quatro temas principais:

- Inventário de substâncias perigosas presentes no CQE;
- Localização de pontos sensíveis;
- Selecção de cenários de acidente;
- Representação dos gráficos das simulações feitas com o RISCAV;
- Determinação dos níveis de risco a que as pessoas estão expostas;
- Elaboração dum mapa de risco para o concelho de Estarreja.

Um dos principais factores que podem condicionar a proporção de eventuais acidentes industriais é a natureza e quantidade de substâncias perigosas presentes, sob a forma de matérias-primas, produtos intermédios, produtos finais, subprodutos ou materiais auxiliares.

Assim na primeira fase de inventariação de substâncias químicas tóxicas presentes no CQE, recorreu-se à informação disponibilizada pela Câmara Municipal de Estarreja e pela Protecção Civil através do Plano Emergência Externa de Estarreja de 2006 disponível Online (URL 9). Foca-se essencialmente nas substâncias armazenadas nas diferentes indústria do CQE, e os perigos que daí podem surgir, tendo sido retirados os seguintes dados:

Tabela 5.4 Principais produtos perigosos existentes no Complexo Químico de Estarreja (URL 9)

Produto	Empresa	Capacidade nominal existente (ton)	Volume máximo concentrado (ton)
Amoníaco	Quimigal Anilina e derivados	520	130
	Dow	12	12
	AR Liquido	12	9
Cloreto de vinilo	CIRES	500	200
Cloro	DOW ^a	0,5	0,5
	Quimigal Cloro Alcalis	510	100
Fosgénio	DOW	17	5 ^b

Capacidade Nominal Existente - Quantidade máxima teórica do produto nas instalações fabris;

Volume Máximo Concentrado - Volume do maior reservatório (incluindo tubagens).

(a) - Pipeline entre a DOW e QUIMIGAL CLORO ÁLCALIS

(b) - Durante 10% do tempo, 5 ton; 2.5 ton durante 90% do tempo;

O **Amoníaco** (NH₃, CAS 7664-41-7) tem um ponto de ebulição de -33,35 °C, pelo que se apresenta em forma gasosa, à temperatura e pressão atmosférica ambiente. É menos denso que o ar (d=0,6). É uma substância tóxica por inalação, provocando irritação grave dos olhos e membranas mucosas. Apresenta perigo de explosão quando exposto a chamas. Reage violentamente com diversas substâncias. Na literatura da especialidade encontram-se os seguintes valores indicativos dos efeitos que provoca no Homem (SAX, 1996): a concentração mais baixa no ar que provocou efeitos adversos, irritação, foi igual a 14 mg.m⁻³; a concentração mais baixa no ar que provocou a morte de seres humanos foi igual a 21000 mg.m⁻³, para uma exposição de 5 minutos (IDAD, 2007b).

O **Cloro** (Cl₂, CAS 7782-50-5) tem um ponto de ebulição de - 36°C, pelo que se encontra-se no estado gasoso, à temperatura e pressão atmosférica. É mais denso que o ar (d=2,5). É uma substância tóxica por inalação, provocando irritações severas

dos olhos e tracto respiratório. A exposição a concentrações elevadas pode provocar bronquite e acumulação de fluidos nos pulmões. É um oxidante extremamente reactivo. O limite considerado para exposições curtas (STEL) é de 3 mg.m^{-3} e o valor referenciado como apresentando um perigo imediato para a vida e saúde (IDLH) é de 30 mg.m^{-3} (IDAD, 2007b).

O **Cloreto de Vinilo** ($\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$, 0075-01-4) tem um ponto de ebulição de $-13,7^\circ\text{C}$, pelo que se encontra no estado gasoso, a temperatura e pressão atmosférica. É mais denso que o ar ($d=2,2$). É uma substância tóxica por inalação, extremamente inflamável podendo causar o cancro (URL 11).

O **Fosgénio** (COCl_2 , CAS 75-44-5) tem um ponto de ebulição de $7,6^\circ\text{C}$, pelo que se encontra numa vasta gama de condições ambientes e processuais na fase gasosa, sendo o vapor mais denso que o ar ($d=3,4$). É uma substância tóxica por inalação, provocando irritação grave dos olhos, pele e membranas mucosas, e podendo ser letal. Na literatura da especialidade encontram-se os seguintes valores indicativos dos efeitos que provoca no Homem (SAX, 1996): a concentração mais baixa no ar que provocou efeitos adversos, para uma exposição de 30 minutos, foi igual a 100 mg/m^3 , tendo os efeitos sido observados a nível pulmonar; a concentração mais baixa no ar que provocou a morte de seres humanos foi igual a 360 mg/m^3 e também para uma exposição de 30 minutos. De acordo com a *American Industrial Hygiene Association*, os limiares considerados para a exposição ao Fosgénio serão 4 mg.m^{-3} (ERPG-3, *Emergency Response Planning Guidelines*) limiar abaixo do qual a exposição durante 1 hora não representa perigo imediato para a vida, e $0,2 \text{ mg.m}^{-3}$ (ERPG-2), concentração abaixo da qual, nas mesmas condições de exposição, não ocorrerão danos permanentes (IDAD, 2007a).

5.3.1 Localização de pontos sensíveis

Da análise dos parâmetros meteorológicos anteriormente citados é possível verificar que os ventos predominantes nesta região são ventos vindos de Norte e Noroeste que, em caso de libertação accidental no CQE, as freguesias mais afectadas seriam:

Beduído, Salreu, Canelas e Fermelã. É de realçar que a freguesia Beduído é a mais povoada e a que esta mais próxima do CQE situando-se imediatamente a Sul deste.

Da análise feita, tentou-se limitar as fontes de erro, através da selecção de pontos sensíveis situados nas freguesias a Sul do CQE. Os pontos críticos escolhidos foram escolas e locais públicos, onde potencialmente possa estar população que pode ser afectada pela libertação dum composto químico. Para além das escolas foi seleccionado o local ao ar livre onde decorre com frequência semanal uma feira, com a presença normalmente de 1000 clientes e 280 vendedores (fonte PSP Estarreja). Tendo em conta, que as condições atmosféricas favoráveis implicam uma maior adesão ao recinto de feiras, bem como aos recreios das escola, o que no nosso caso de estudo isto se verifica.

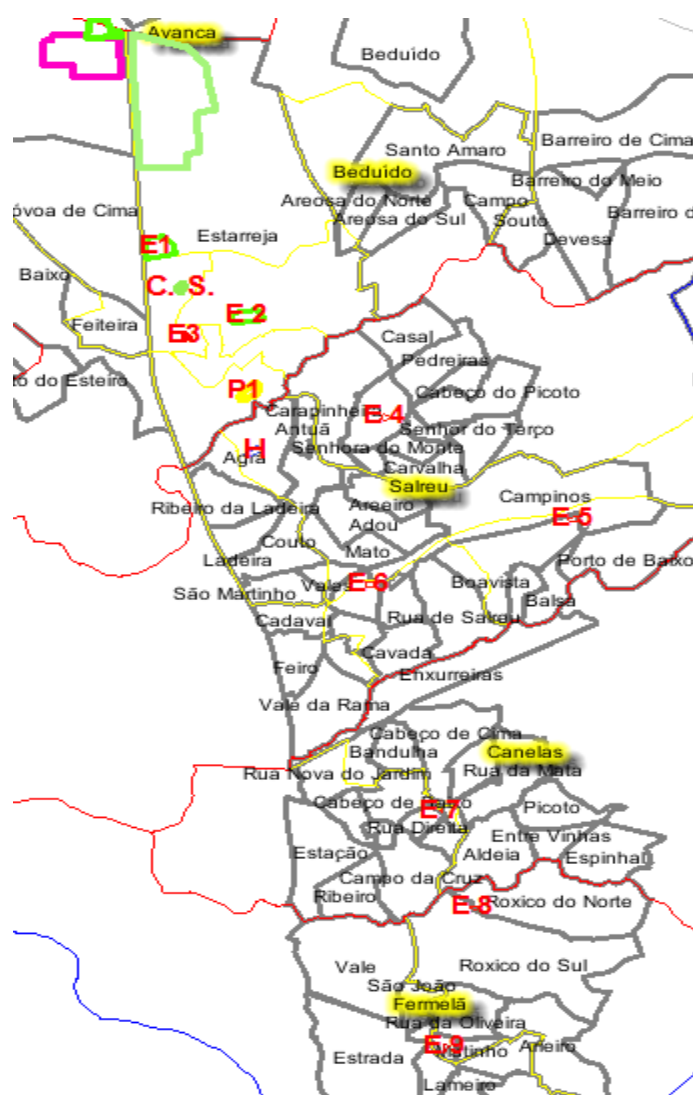


Figura 5.5 Localização de pontos sensíveis escolas, hospital, unidade de saúde, Mercado e Recinto de feiras (URL 10)

Tabela 5.5 Distância dos diferentes pontos críticos à fonte

Ponto sensível	P1	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Distância à fonte	3300m	1900m	2700m	2700m	3950m	5500m	5200m	7200m	8000m	9100m

Tabela 5.6 Correspondência entre indicadores no mapa a escolas do concelho de Estarreja.

FREGUESIAS	IDENTIFICAÇÃO MAPA	ESCOLAS	ALUNOS/CLIENTES	DOCENTES, AUXILIARES E OUTROS
BEDUÍDO	E 1	EB2,3 Padre Donaciano de Abreu Freire (c)	653	198
	E 3	Escola 1.º Ciclo Agro (d)	107	8
	E 3	Jardim Infância Agro (d)	20	1
	E1	Escola 1.º Ciclo Paço (c)	109	8
	E1	Jardim Infância Paço(c)	22	2
	E2	Escola Secundária de Estarreja	1200	188
CANELAS	E7	Escola 1.º Ciclo Canelas (e)	50	3
	E7	Jardim Infância Canelas (e)	19	2
FERMELÃ	E9	Escola 1.º Ciclo Terras do Monte	56	5
	E8	Jardim Infância Roxico	9	1
SALREU	E6	Escola 1.º Ciclo Ladeiras (f)	81	6
	E6	Jardim Infância Ladeiras (f)	39	3
	E4	Escola 1.º Ciclo da Senhora do Monte (g)	59	4
	E4	Jardim Infância da Senhora do Monte (g)	21	2
	E5	Jardim Infância do Vale do Castanheiro	13	1
BEDUÍDO	P1	Recinto de Feira	1000	280
SUBTOTAL			3458	712
TOTAL			4170	

Nota: (c), (d), (e), (f) e (g) As escola e Jardins de infância identificadas com as mesmas letras partilham o mesmo espaço físico.

6 Aplicação do sistema RISCAV ao caso de estudo

O principal objectivo deste capítulo é a analisar os diferentes cenários de acidente para diferentes condições atmosféricas, nomeadamente, diferentes classes de estabilidade e velocidade do vento. Para poder complementar esta análise é feita uma análise qualitativa das representações e quantitativa das concentrações máximas obtidas das simulações do RISCAV, para poder definir a condição para qual a população e o ambiente estariam expostos a maior risco.

6.1 Cenários de acidente

De acordo com a actividade desenvolvida no CQE, podem ser considerados dois tipos de acidente que podem ocorrer no CQE, nomeadamente a ruptura de um pipeline e a ruptura catastrófica de um depósito de armazenamento. Para o caso de estudo definido, optou por simular-se o colapso total de um depósito, devido às grandes quantidades envolvidas no processo de armazenamento, e também pelo facto de existirem mecanismos de detecção de fugas em pipeline. Muitos desses mecanismos estão preparados para fechar por completo a corrente e composto químico que circula no seu interior limitando assim, a quantidade de material libertado em caso de fuga.

Com isto, a análise de cenários de acidente foi efectuada tomando como caso de estudo a libertação total aproximadamente instantânea da maior quantidade de substância perigosa contida num único equipamento.

Para o desenvolvimento de cenários de acidente foi tida em consideração a existência de mecanismos passivos de limitação de consequências, cuja eficácia não depende da intervenção em caso de emergência. Este pressuposto permite considerar os piores acidentes possíveis, sendo credíveis, relevantes para a definição de eventuais zonas de perigos, de acordo com os objectivos deste trabalho.

As simulações das consequências associadas aos acidentes nas unidades de armazenamento de Cloro e Fosgénio. A selecção destes produtos químicos é resultado da sua perigosidade e consequências severas de exposição humana em caso de acidente. Dos cenários apresentados é possível representar graficamente a evolução da nuvem de Fosgénio aos 5, 10 e 30 minutos após o início da libertação. Posteriormente fez-se a comparação dos resultados obtidos aos 30 minutos após a

libertação para ambos os compostos, neste caso, através da dimensão da nuvem em relação à quantidade de produto libertado.

Não foram analisadas todas as substâncias inflamáveis, cujo principal risco resulta da ocorrência de incêndios, uma vez que, o efeito directo nos incêndios para o exterior do complexo químico pode ser considerado reduzido. Os aspectos mais importantes neste domínio consistem no controlo do incêndio, para evitar a propagação do mesmo a outras unidades, e na emissão de gases e partículas para a atmosfera. Neste caso não será analisada por se encontrar, de certa forma, nos objectivos do presente trabalho.

As simulações efectuadas não tiveram em consideração a existência de diferentes tipos de falha, as respectivas probabilidades de ocorrência ou a actuação de sistemas de emergência. No presente estudo é feita a abordagem de um caso limite hipotético que poderá ser considerado o pior cenário possível para os cenários de acidentes de maior credibilidade. Foram apenas considerados cenários catastróficos, correspondendo à libertação aproximadamente instantânea, do produto contido no equipamento de maior capacidade.

6.1.1 Condições de Armazenamento dos compostos químicos Cloro e Fosgénio

Na definição de cenário de acidente é importante identificar a quantidade de composto libertado (Tabela 5.4), e saber as condições de armazenamento dos compostos químicos seleccionados. O cálculo das quantidades de compostos químicos armazenados, definidas com base na informação presente na Tabela 5.4, através da qual se determinam o volume ocupado por essa mesmo composto, considerando a temperatura de armazenamento abaixo da temperatura de ebulição do composto. A densidade relativa do Cloro líquido e do Fosgénio líquido é de 1600 kg.m^{-3} e 1400 kg.m^{-3} respectivamente.

Em que:

Volume do composto = massa do composto/densidade relativa do composto

$$V_{\text{Cloro}} = \frac{100000 \text{ kg}}{1600 \text{ kg.m}^{-3}}$$

$$V_{\text{Fosgénio}} = \frac{5000 \text{ kg}}{1400 \text{ kg.m}^{-3}}$$

Os depósitos de armazenamento de Cloro e Fosgénio, operam nas seguintes condições:

Tabela 6.1 Condições de armazenamento do Cloro e Fosgénio.

	Temperatura de armazenamento (°C)	Volume do depósito (m ³)	Capacidade de utilização do depósito (%)	Pressão (bar)
Cloro	-37	62,5	90	1
Fosgénio	0	3,6	90	1

É com base nos volumes calculados, apresentados na tabela 6.1 que serão feitas as simulações no sistema RISCAV.

6.1.2 Condições meteorológicas para ambas as simulações Cloro e Fosgénio para as diferentes classes de estabilidade

Da análise dos dados meteorológicos, é possível verificar que o vento apresenta-se maioritariamente do quadrante Norte. Contudo, foi utilizada a direcção NW nas simulações. Esta situação referida deve-se ao facto, da direcção afectar muito mais população do que a mais frequente, sendo que esta corresponde à segunda direcção do vento mais frequentes. As condições meteorológicas utilizadas na simulação aplicadas ao caso de Estarreja, são apresentadas na Tabela 6.2, onde foram consideradas diferentes de classes de estabilidade e velocidade do vento para as estações do ano, Verão e Inverno.

6.2 Condições meteorológicas escolhidas para a definição do pior caso possível

	Verão				Inverno		
Substância libertada	Fosgénio			Cloro	Fosgénio		
Classe de estabilidade	A	D	F	D	A	D	F
Vel. do Vento (m.s⁻¹)	1	5	1	5	1	5	1
RAD W.m⁻²	1000	600	0	600	1000	600	0

Destas simulações será analisado a situação com maior área afectada e concentrações mais elevadas. Para isso efectuaram-se simulações com o RISCAV com diferentes classes de estabilidade e velocidade de vento, para 5, 10 e 30 minutos após a libertação sob condições típicas de Verão. Optou-se por analisar uma situação de Verão visto serem obtidas valores de concentração máximos de Fosgénio (Tabela 6.11).

6.2 Análise qualitativa das simulações

No decorrer desta secção irão ser apresentados os resultados das simulações para o composto Fosgénio, considerando diferentes classes de estabilidade e velocidade do vento.

A primeira série de três representações simuladas em que a dispersão da nuvem de Fosgénio para as condições meteorológicas de Classe A, a segunda série de três representações é referente à classe de estabilidade D, em que é comparada uma nuvem de Cloro com a nuvem de Fosgénio 30 minutos após a libertação, por último a terceira série onde são apresentadas as representações da nuvem de Fosgénio para a classe de estabilidade F. A utilização deste composto, esta relacionada com a sua perigosidade, é de salientar que dos compostos presentes no CQE, este seria o mais perigoso para a população e ambiente. Com isto, houve a necessidade de avaliar a variação de concentrações e área afectada variando as classes de estabilidade. Quanto à introdução duma representação de Cloro após 30 minutos a libertação é explicada pela diferença de volumes entre os dois compostos e a área afectada por cada um, no fundo é uma comparação entre a perigosidade do Cloro e Fosgénio.

Na perspectiva de uma melhor compreensão das simulações, são apresentados conceitos utilizados nas representações gráficas das concentrações simuladas:

- STEL – Short Term Exposure Limit – Limite de concentração que não deve ser excedido num período curto de exposição.
- ERPG 2 - Concentração máxima de aerossol, abaixo do qual se acredita que quase todos os indivíduos poderiam estar expostos por até 1 hora, sem experimentar ou desenvolver danos irreversíveis ou de outros efeitos graves para a saúde ou sintomas que possam comprometer as suas capacidades para obter protecção.

- ERPG 3 - Concentração máxima de aerossol abaixo do qual se acredita que quase todos os indivíduos poderiam estar expostos por até 1 hora, sem experimentar ou em desenvolvimento com risco de vida na saúde.
- WHO, (1998) – “Populações expostas a acidentes industriais envolvendo libertações de Fosgénio, relatam uma ampla variedade de sintomas, incluindo dor de cabeça, náuseas, tosse, dispneia, fadiga, dor faríngea, dores no peito, dor intensa nos olhos e forte lacrimejar. Depois de exposições de curta duração ocorre irritação da garganta a 12 mg/m³ e irritação nos olhos a 16 mg/m³” (URL 12).
- TWA (*Time Weighted Average*) Usado especificamente pelos *Occupational Exposure Limits* (OELs) que define a concentração média de um químico a que um trabalhador pode estar exposto por um período de 8 horas (URL 13)
- O TLV-STEL (Threshold Limit Value, Short Term Exposure Limit), é a concentração máxima permitida para um período contínuo de exposição. Este valor é estabelecido para quatro períodos por dia com intervalo de 60 minutos entre cada intervalo (URL 13)

De seguida nas Tabelas 6.3 e 6.4, podemos verificar os limites de concentração dos índices de risco para o Fosgénio e Cloro.

Tabela 6.3 Limites de concentração representados para o Fosgénio

	[mg.m ⁻³]	IR
	0,25	STEL
	0,8	ERPG 2
	4	ERPG 3
	12	WHO

Tabela 6.4 Limites de concentração representados para o Cloro

	[mg.m ³]	IR
	1	TWA
	3	STEL

6.2.1 Simulação da evolução da nuvem de Fosgénio para classe de estabilidade A aos 5, 10 e 30 minutos

Nesta secção são apresentadas três representações da evolução da nuvem Fosgénio para os 5, 10 e 30 minutos para a classe de estabilidade A. De seguida, no final de cada representação é analisada qualitativamente o resultado de cada uma.

Apresenta-se de na Figura 6.1 simulação da evolução da nuvem de Fosgénio cinco minutos após a libertação:

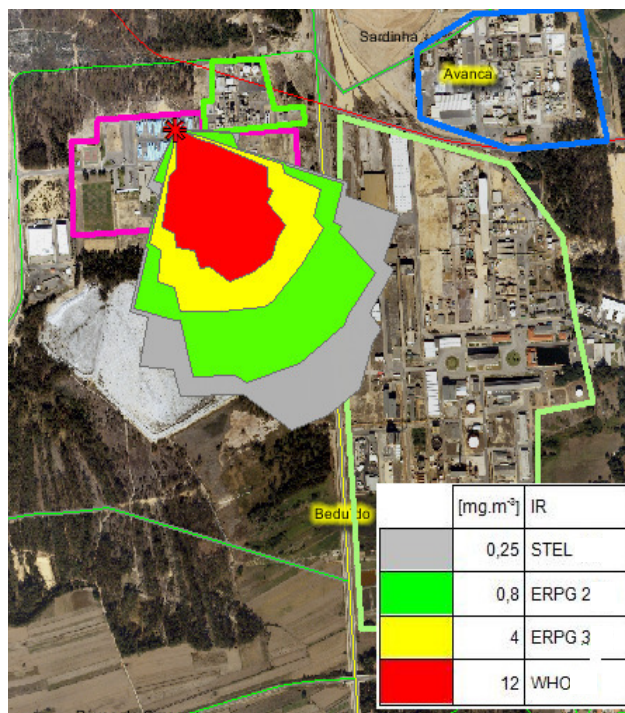


Figura 6.1 Simulação RISCALV para Classe de estabilidade A 5 minutos após o acidente.

A análise da simulação anterior permite concluir que as consequências da libertação estão apenas confinadas ao interior do CQE. Isto pode ser explicado pela fase inicial, em que a nuvem se encontra visto só terem passado 5 minutos após o colapso total do depósito e existe uma predominância da gravidade na dispersão da nuvem de gás pesado.

A Figura 6.2 esta a representação da nuvem de Fosgénio para dez minutos após a libertação:

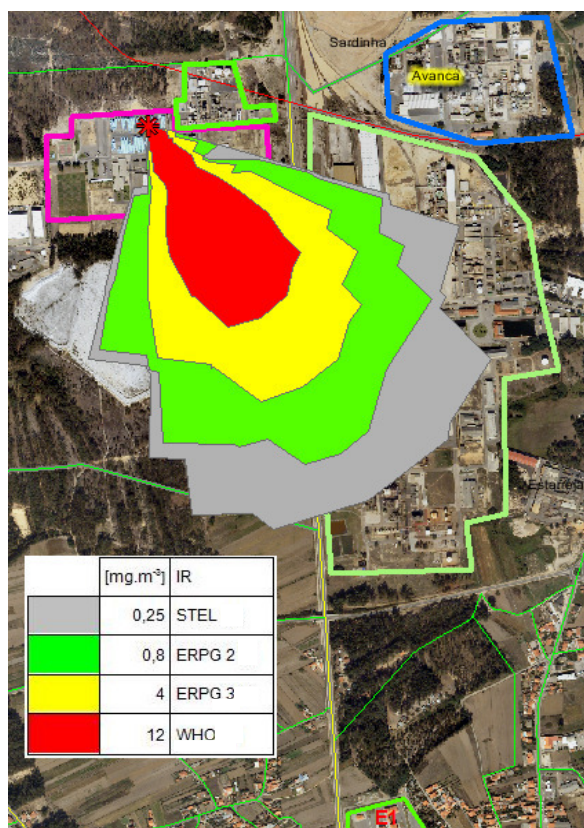


Figura 6.2 Simulação RISCALV para Classe de estabilidade A 10 minutos após o acidente.

Analisando a Figura 6.2 pode observar-se que a nuvem de gás continua quase confinada ao perímetro do CQE, dirigindo-se para Sul do mesmo. Ainda não é possível observar que a nuvem atinge algum dos pontos sensíveis considerados no capítulo anterior.

A Figura 6.3 é representada a nuvem de Fosgénio Trinta minutos após a libertação:

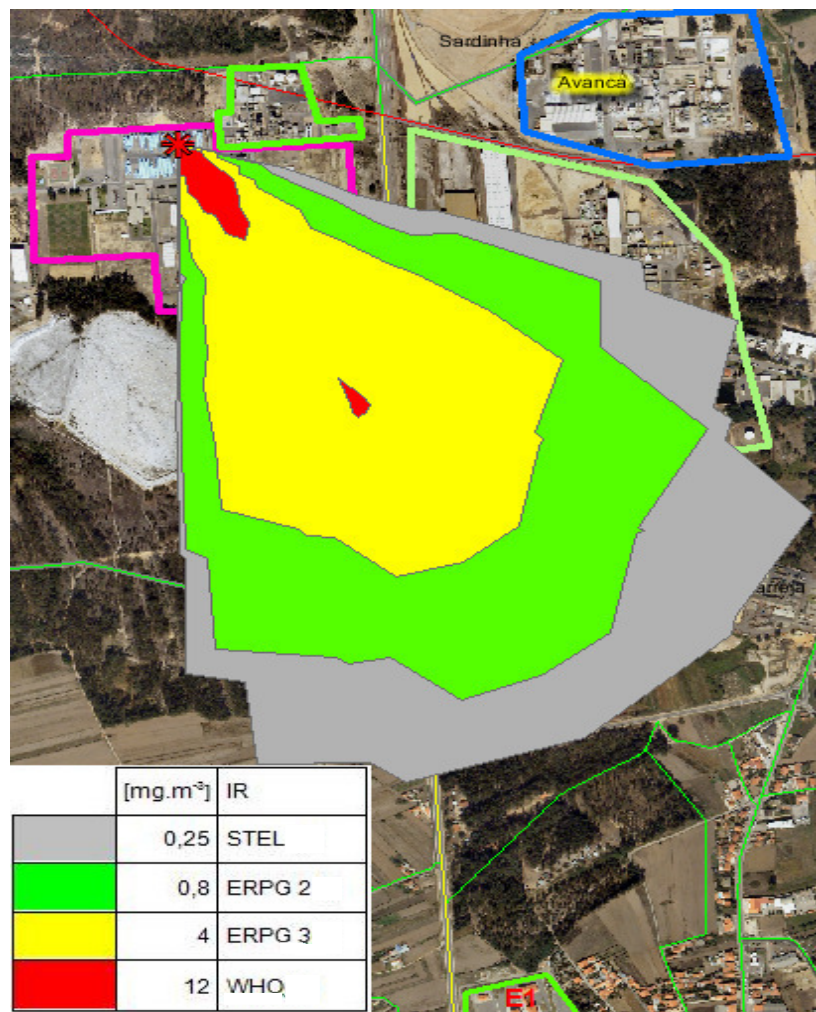


Figura 6.3 Simulação RISCAV para Classe de estabilidade A 30 minutos após o acidente.

Trinta minutos após, pode observar-se que existe um aumento substancial da nuvem de Fosgénio tanto em largura como em comprimento, embora as concentrações menores resultantes da diluição do composto. A nuvem continua a atingir basicamente instalações do CQE, e ainda não se pode afirmar que esta pode ser um potencial perigo para os pontos sensíveis considerados, embora possa ter atingido algumas habitações próximas do CQE.

De um modo geral, através das Figuras 6.1 à 6.3 verificou-se que, para a classe de estabilidade A pode constatar-se que os danos que puderam ser causados iram ser sentidos quase exclusivamente no interior do CQE, sem atingir nenhum dos pontos considerados sensíveis. É de realçar as concentrações bastante elevadas sentidas dentro do CQE, o que puderam vir a causar graves danos na saúde dos trabalhadores do presentes nas indústrias.

6.2.2 Simulação da evolução da nuvem de Fosgénio para classe de estabilidade D aos 5, 10 e 30 minutos após a libertação e simulação de Cloro para 30 minutos após a libertação.

As simulações representadas nesta secção são referentes à classe de estabilidade D, em que é apresentado na Figura 5.3 como a mais frequente para Estarreja. Dada a grande frequência desta classe de estabilidade para o local, pode afirmar-se que, este será o cenário de dispersão, mais provável de acontecer, em caso de libertação accidental de um gás pesado.

A figura 6.4 representa a dispersão da nuvem cinco minutos após a libertação:

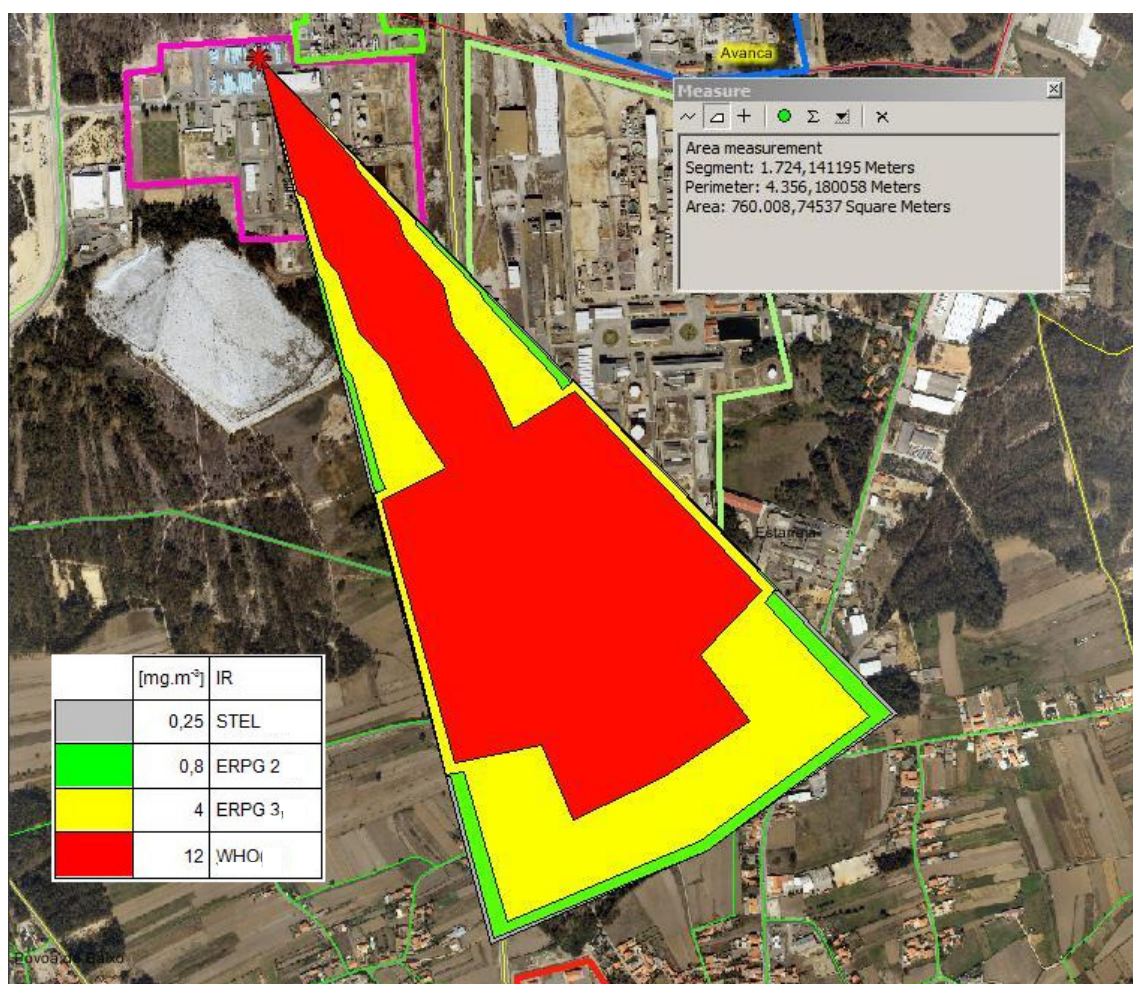


Figura 6.4 Simulação da nuvem de Fosgénio para 5 minutos após a libertação

Cinco minutos após a libertação pode-se observar que a dimensão da nuvem não é muito considerável, limitando-se quase aos danos *in loco*, embora já tenha atingidas

zonas urbanizadas. É de realçar que a nuvem tem uma maior extensão do que no caso anteriormente analisado.

Dos locais considerados como sendo locais críticos nenhum deles até então foi atingido pela nuvem de gás, no entanto pode verificar-se que a escola EB2,3 Padre Donaciano de Abreu Freire será afectada pela nuvem posteriormente.

A representação de dez minutos após a libertação é apresentada na Figura 6.5:

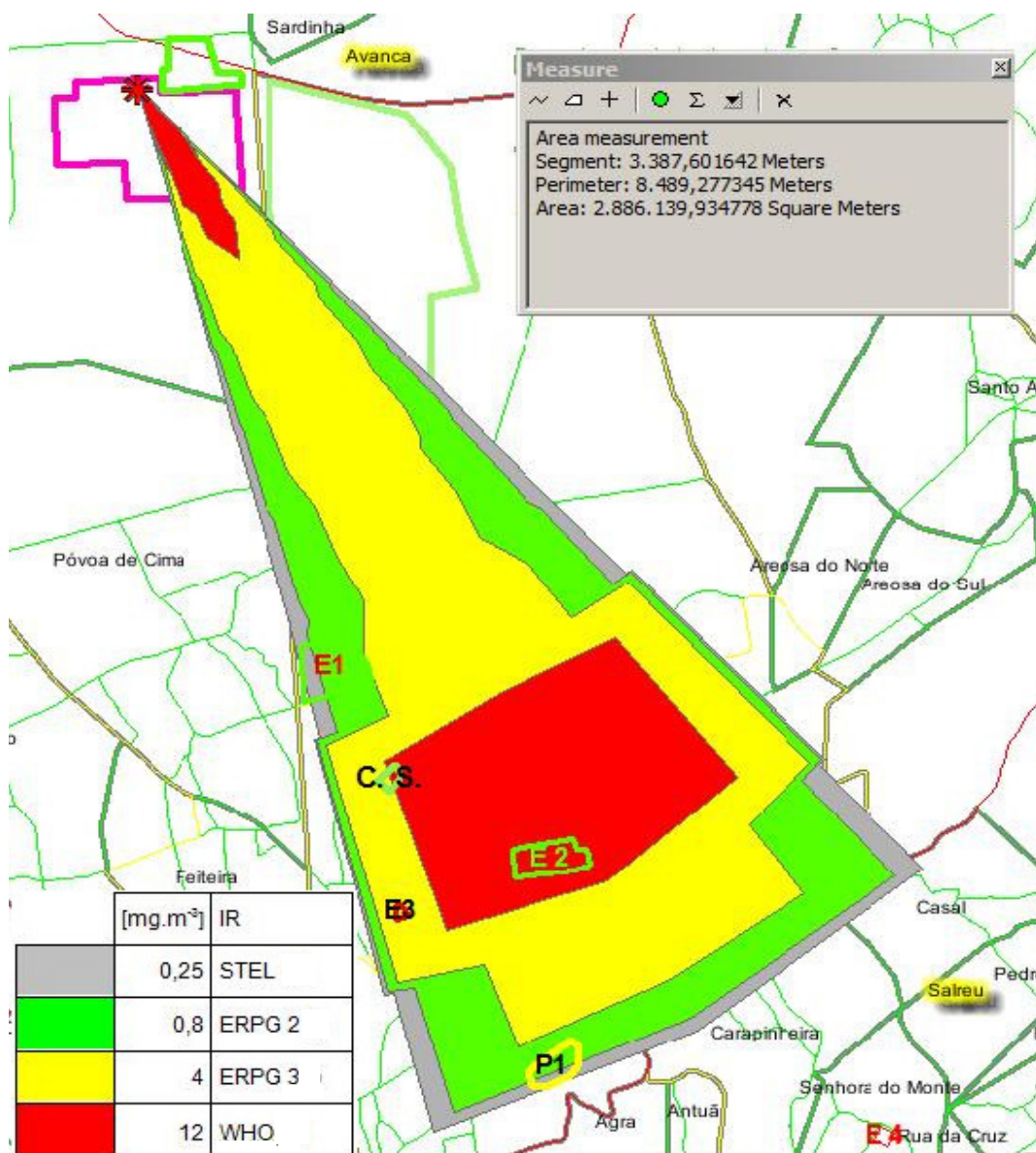


Figura 6.5 Simulação da nuvem de Fosgénio após 10 minutos da libertação.

Dez minutos após a libertação é possível verificar um aumento da extensão e da área da nuvem, já interceptando alguns dos nossos pontos sensíveis. Sabendo que a zona a vermelho é a zona em que a população estará exposta a valores de concentração superiores a 12 mg.m^{-3} . Dos pontos críticos fixos, os mais afectados seriam exactamente a Escola Secundária de Estarreja, a EB1JI do Agro, a EB2,3 Padre Donaciano de Abreu Freire, bem como o Recinto de Feiras e Mercado. A população mais afectada, é de facto a das escolas anteriormente citadas, sendo que o ponto mais crítico a nível de concentração é a Escola Secundária de Estarreja. De realçar que esta escola é a que possui maior número de alunos e por consequência o maior número de pessoas expostas. De acordo com a (WHO, 1998), a partir dos 12 mg.m^{-3} irritação na garganta e a partir de 16 mg.m^{-3} irritação ocular, sendo que em alguns casos pode vir a trazer problemas de maior quando a exposição é mais prolongada, como dores no peito e tosse. Esta informação pode tornar-se preocupante, dado ser uma grande quantidade de pessoas expostas a estes níveis de concentrações.

No local E3 seriam afectadas 136 pessoas por concentrações de 4 mg.m^{-3} (ERPG 3) a 12 mg.m^{-3} , este valor é estipulado para adultos saudáveis, neste caso considera-se crianças até aos dez anos o que podemos extrapolar que estes podem vir a ser mais sensíveis a estes níveis de concentração e fazerem-se sentir alguns sintomas próprios da exposição ao Fosgénio, normalmente problemas nas vias respiratórias superiores (WHO, 1998).

Nos locais E1, e P1 as concentrações variam entre os $0,8$ e 4 mg.m^{-3} o total de população que seria afectada é 2381 pessoas presentes nesses dois locais. Crianças e grupos de risco podem manifestar sintomas de contacto com o químico, embora indivíduos expostos a este nível de concentrações podem eventualmente não manifestar nenhum sintoma ligado ao contacto com o Fosgénio (WHO 1998).

Tabela 6.5 Número de pessoas expostas por local e por concentração

	Clientes/alunos	Docentes, auxiliares e outros	Total/escola	Concentração [mg.m ⁻³]
EB2,3 Padre Donaciano de Abreu Freire [E1]	653	198	851	0,8
Escola 1.º Ciclo Agro [E3]	107	8	115	4
Jardim Infância Agro [E3]	20	1	21	4
Escola 1.º Ciclo Paço [E1]	109	8	117	0,8
Jardim Infância Paço [E1]	22	2	24	0,8
Escola Secundária de Estarreja [E2]	1200	188	1388	12
Recinto de feiras [P1]	1000	280	1280	0,8
		Total	3796	

Ao final de dez minutos estariam 3796 pessoas em risco de exposição a concentrações consideráveis de Fosgénio, 1388 pessoas podem vir a precisar de assistência médica imediata e algumas mais sensíveis com possibilidade de vir a desenvolver problemas de maior. Das 136 pessoas presentes no E3 estariam expostas a níveis de concentração consideráveis que vão da gama de 4 a 12 mg.m⁻³ o que puderam vir a necessitar de assistência médica. Nos locais onde são atingidos por concentrações mais baixas podem ser um problema, pois pessoas mais sensíveis (idosos, crianças e pessoas com problemas respiratórios) puderam ter que ser assistidas. É um facto que estas concentrações não se manem por muito tempo mas, mesmo exposições de curtos espaços de tempo podem ter consequências severas para a saúde humana e ambiente.

A Figura 6.6 é apresentada a nuvem de Fosgénio trinta minutos após a libertação:

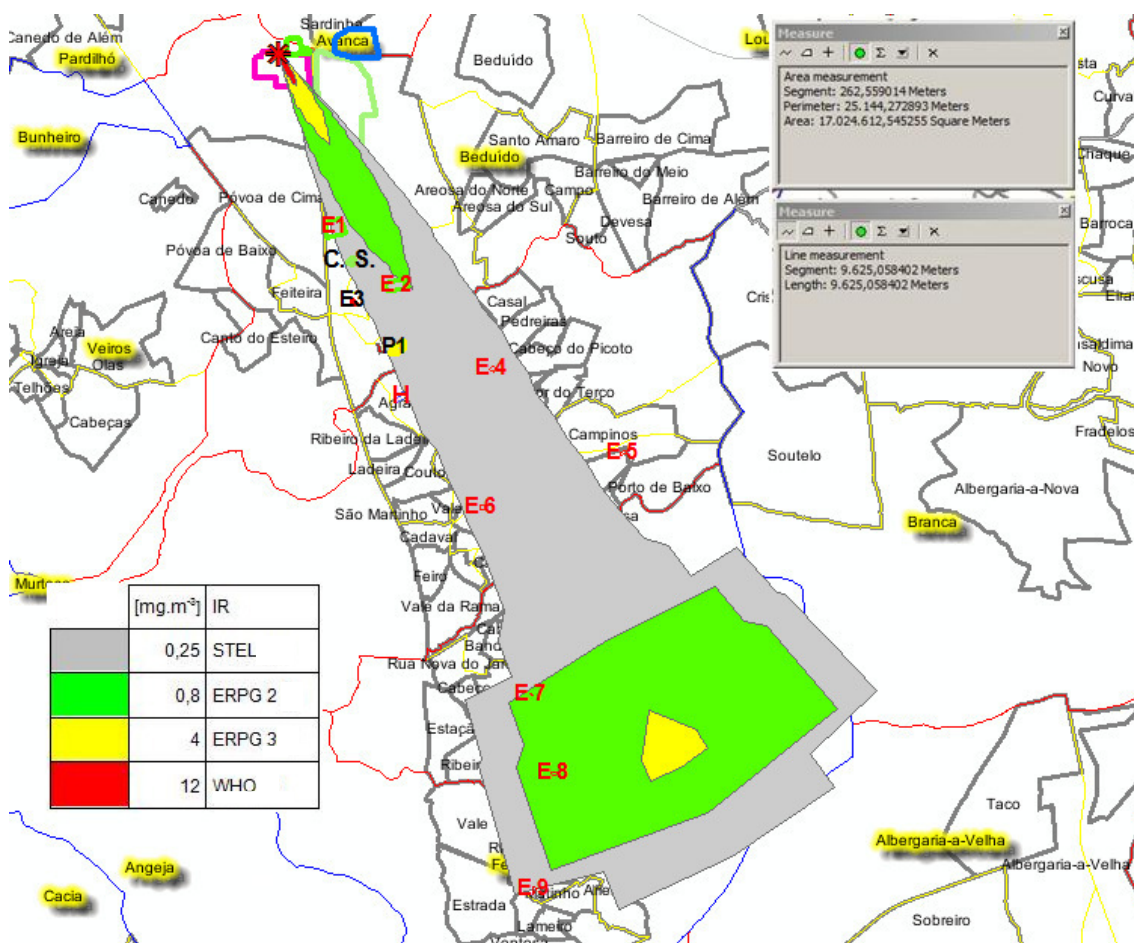


Figura 6.6 Simulação da nuvem de Fosgénio após 30 minutos da libertação.

Trinta minutos após a libertação de 3,6 m³ de Fosgénio é possível ainda verificar níveis de risco consideráveis, mesmo que a nuvem agora se comporte como gás passivo. É de salientar que esta nuvem possui uma extensão de cerca de 9,6 km e uma área de 17 km² embora as concentrações não serem tão elevadas como no início.

De referir que quase todos os pontos sensíveis identificados serão afectados pela nuvem, além disso, escolas situadas a mais 7 km da fonte ainda são atingidas por concentrações na ordem de 0,25 mg.m⁻³ a 0,8 mg.m⁻³.

As descontinuidades observadas na isolinha de maior concentração nos resultados obtidos aos 10 e 30 minutos, deve-se ao facto do RISCNAV ser multi-puff, este tipo de resultados é normal no cenário de colapso total, visto que depois do colapso total todo o líquido contido no reservatório, ao entrar em contacto com a atmosfera gera uma

grande nuvem de químico e lago líquido com evaporação, sendo posteriormente arrastada na frente da nuvem com elevada concentração daí a descontinuidade.

6.2.3 Simulação de Cloro passados 30 minutos após a libertação:

Representação gráfica dos resultados da simulação com o RISCACV para as condições de armazenamento descritas na tabela 6.1 e com os parâmetros meteorológicos presentes na tabela 6.2. Esta simulação servirá como termo de comparação entre o Cloro e o Fosgénio depois de 30 minutos após a libertação.

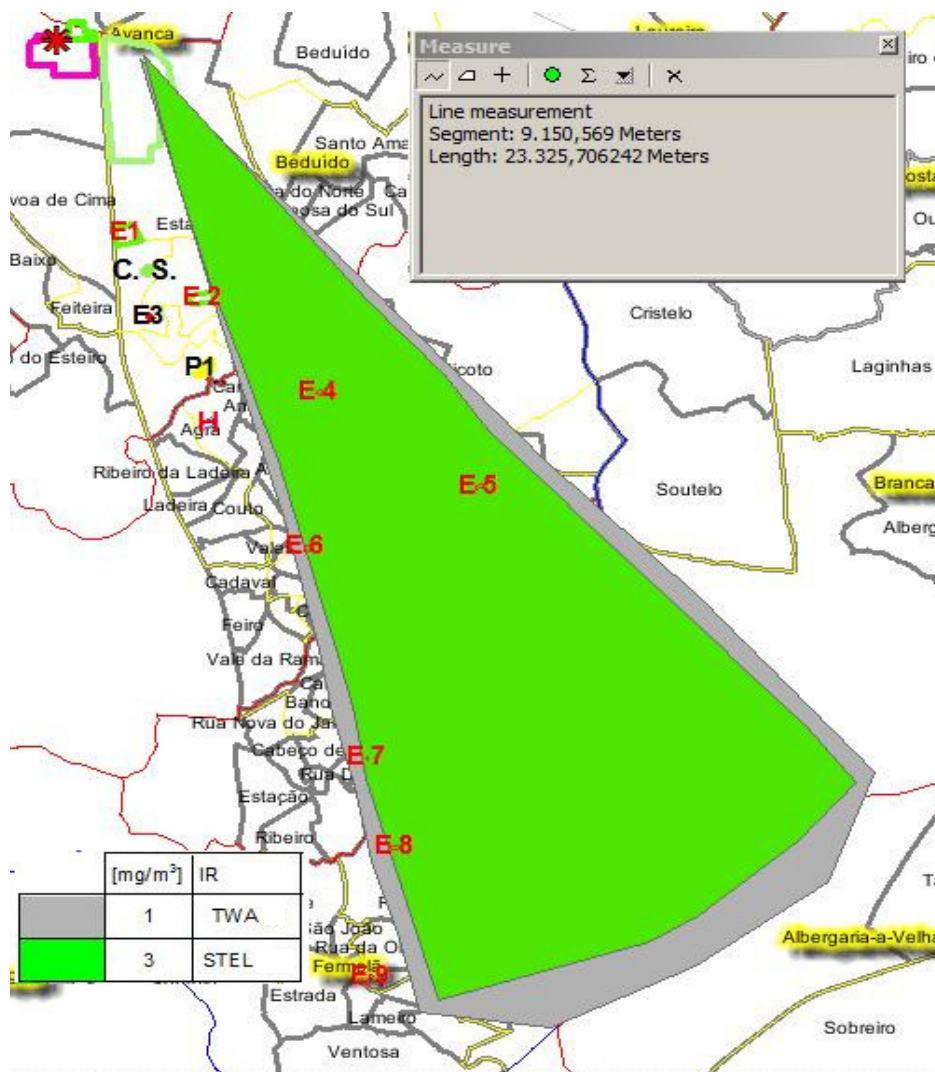


Figura 6.7 Simulação da nuvem de Cloro, após 30 minutos da libertação.

Relativamente ao Cloro é interessante avaliar as diferenças entre a área afectada, sendo esta maior do que a do Fosgénio (figura 6.6). Neste caso considera-se a libertação de 62,5 m³ de Cloro comparativamente aos 3,6 m³ de Fosgénio. Atendendo

a este facto, pode verificar-se que uma quantidade significativamente menor de Fosgénio pode afectar quase uma área tão grande como a afectada pela libertação de Cloro.

6.2.4 Simulação da evolução da nuvem de Fosgénio para classe de estabilidade F aos 5, 10 e 30 minutos após a libertação.

Esta classe de estabilidade é quase sempre verificada em períodos nocturnos, são períodos de grande estabilidade atmosférica normalmente acompanhado de vento fraco. É a segunda classe de estabilidade mais frequente na região de Estarreja.

A nuvem e Fosgénio, Cinco minutos após a libertação tem a representação apresentada na figura 6.8:

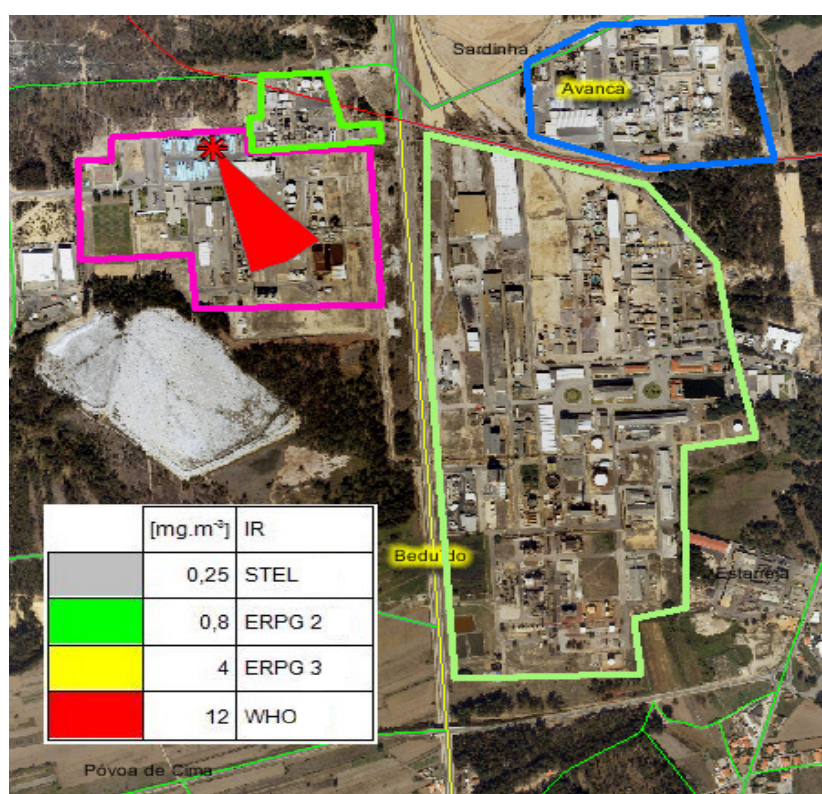


Figura 6.8 Simulação RISCAV para Classe de estabilidade F 5 minutos após o acidente

Da figura 6.8, pode observar-se uma fraca dispersão atmosférica, mas com elevadas concentrações. Este fenómeno deve-se à fraca razão de mistura que normalmente

ocorre em situação com classe de estabilidade F, resultado da grande estabilidade atmosférica.

Na figura 6.9 é representada a nuvem de Fosgénio dez minutos após a libertação:

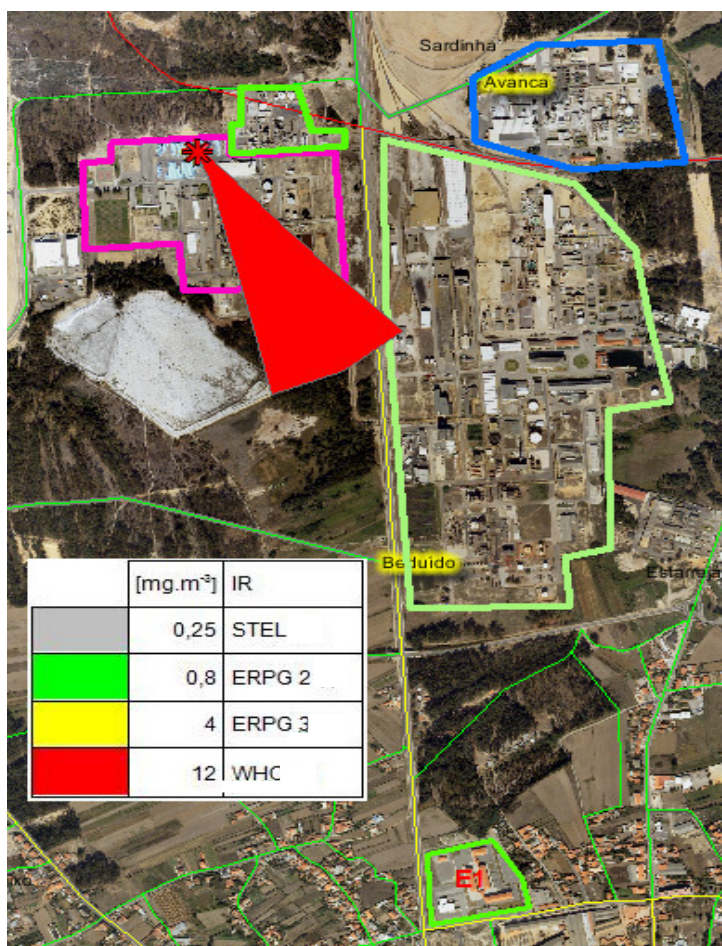


Figura 6.9 Simulação RISCAV para Classe de estabilidade F, 10 minutos após o acidente.

A representação anterior permite verificar que existe um aumento da nuvem de gás, muito compacta em termos de concentrações mas com um alcance relativamente pequeno em relação aos pontos sensíveis. É visível que as instalações das empresas do CQE são severamente afectadas com concentrações muito altas de Fosgénio.

Aos Trinta minutos após a libertação a nuvem de Fosgénio como representação como apresentado na Figura 6.10:

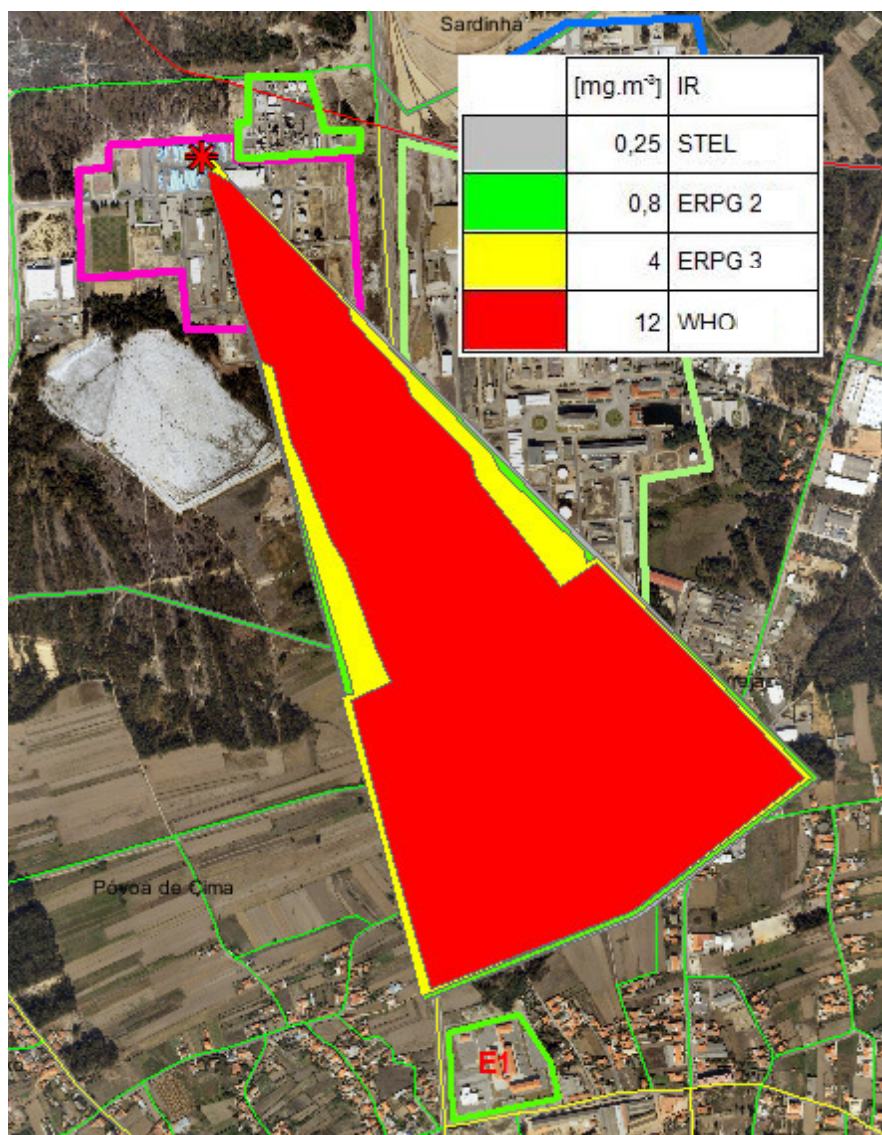


Figura 6.10 Simulação RISCAL para Classe de estabilidade F 30 minutos após o acidente.

A nuvem de Fosgénio após trinta minutos aumentou consideravelmente de tamanho, em relação às representações anteriores nota-se que a nuvem sofreu alguma diluição mas continuando com concentrações elevadas na frente da nuvem. Embora as concentrações serem bastante elevadas pode verificar-se que até agora a escola EB2,3 Padre Donaciano de Abreu Freire o ponto sensível mais próximo do CQE não é afectado.

6.3 Análise quantitativa da evolução das concentrações máximas e índices de risco a que a população está exposta

Através da análise qualitativa, foi possível verificar a influência das classes de estabilidade na dispersão de gases pesados.

Para avaliar de forma mais precisa as classes de estabilidade e ventos na influência na dispersão de gases pesados realizou-se o estudo das concentrações máximas atingidas para cada intervalo de tempo após a libertação e para cada condição meteorológica apresentada na Tabela 6.6. Na Tabela abaixo é apresentada a comparação das concentrações máximas para as diferentes classes de estabilidade e estações do ano, Verão e Inverno.

Tabela 6.6 Concentrações máximas para as diferentes classes de estabilidade e velocidades do vento

		Verão			Inverno		
Substância libertada		Fosgénio			Fosgénio		
Classe de estabilidade		A	D	F	A	D	F
Velocidade do Vento		1	5	1	1	5	1
RAD W/m ²		1000	600	0	1000	600	0
Concentrações máximas [mg/m³]	5 minutos	9117,4	18199,6	207382,6	5303,4	8142,9	103392,2
	10 minutos	5789,6	11291,3	182169,9	3549	5489,0	71707,8
	15 minutos	4541,7	8725,5	147828,5	2879,9	4475,2	59549,5
	30 minutos	2680,1	4951,6	95277,9	1856,2	2919,8	40759,1
	45 minutos	2005,2	3612,2	75462,7	1470,1	2330,9	24,5
	60 minutos	0,8	0,2	51,4	0,6	0,2	18,7

Da análise da tabela 6.6 é bem patente que a alteração da temperatura ambiente, da velocidade do vento e consequentemente da classe de estabilidade, pode alterar significativamente as concentrações máximas dos compostos químicos libertados ao longo do tempo. É também visível que as concentrações são fortemente afectadas pela temperatura ambiente, sendo que a diferença é aproximadamente o dobro no Verão em relação à temperatura de Inverno.

Seguidamente estão representados os diferentes gráficos de evolução das concentrações de Fosgénio ao longo do tempo, para as diferentes classes de estabilidade e estações do ano.

Na figura 6.11 está representada a evolução das concentrações para as estações de Verão e Inverno para a classe de estabilidade A.

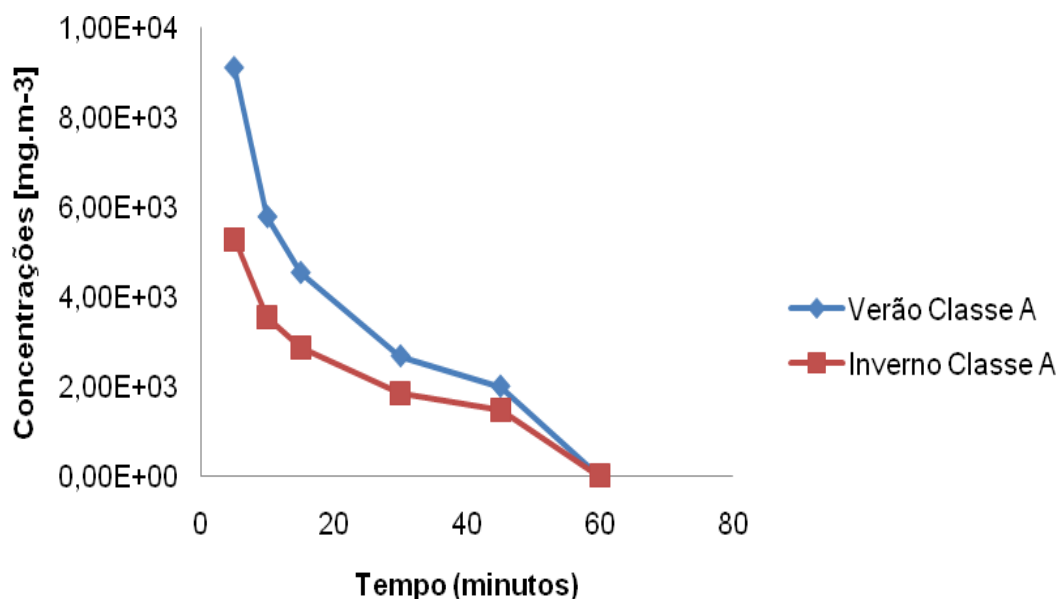


Figura 6.11 Evolução das concentrações para a classe de estabilidade A variando a temperatura ambiente.

As diferenças das concentrações máximas é influenciada pela temperatura exterior, bastante perceptível na figura 6.11. A evolução das concentrações é constante ao longo do tempo igualando-se quase após 60 minutos. A tendência de decrescimento das concentrações para as duas estações do ano é a mesma, sendo que existe um maior decrescimento das concentrações dos 5 para os 10 minutos para a situação de Verão.

A evolução das concentrações máximas para a classe de estabilidade D, para o Verão e Inverno, está presente na figura 6.12.

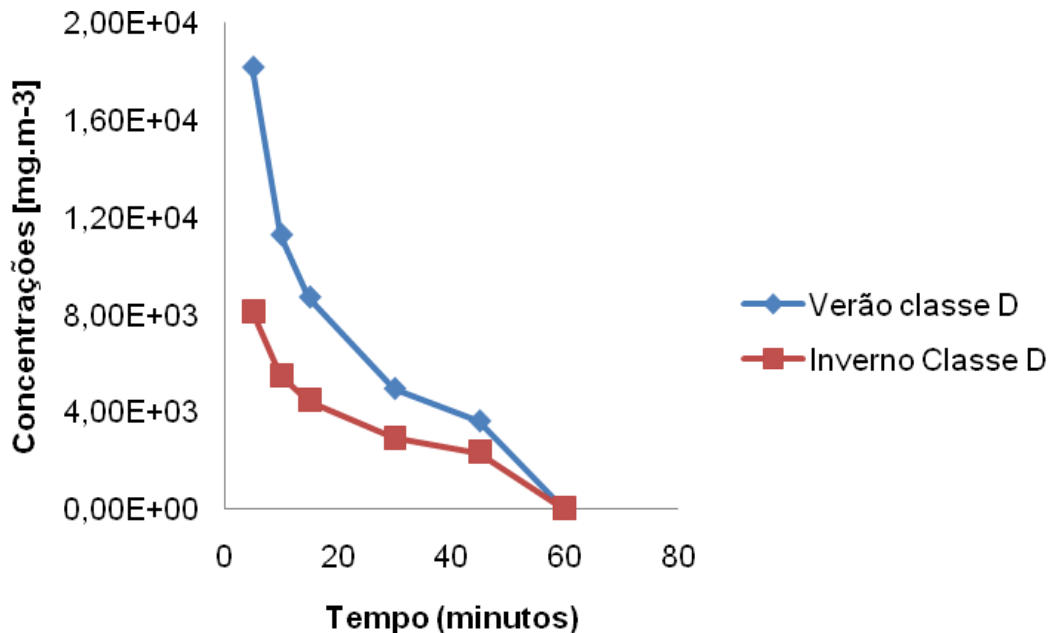


Figura 6.12 Evolução das concentrações para a classe de estabilidade D variando a temperatura ambiente.

Pode verificar-se que existem também diferenças grandes nas concentrações para Inverno e Verão, de realçar ainda que, para a estação mais quente as concentrações iniciais duplicam, em relação às verificadas na estação mais fria. Contudo, também permite verificar que as concentrações dos 5 minutos para os 10 minutos, para o Verão, descem drasticamente, isto deve-se ao facto de que quer o solo quer o ar estão mais quentes e a evaporação é mais rápida.

Por último apresentaram-se a evolução das concentrações máximas para a classe F para as duas estações

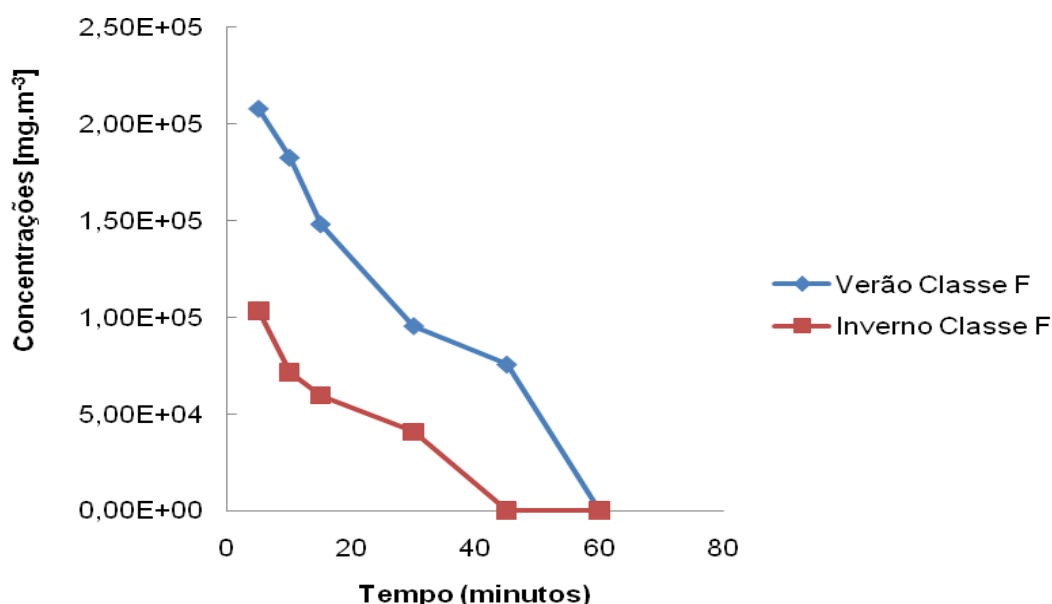


Figura 6.13 Evolução das concentrações para a classe de estabilidade F variando a temperatura ambiente.

Da análise da figura 6.13 é possível verificar que as concentrações são as mais elevadas entre as classes de estabilidade consideradas. A linha de tendência não é semelhante à das outras classes, visto que aos 45 minutos as concentrações para inverno estão na mesma ordem de grandeza das calculadas aos 60 minutos. Permite também concluir que a diferença das concentrações entre os 5 e os 10 minutos é menos acentuada do que nas classes A e D, isto permite explicar que nuvens de gás pesado na fase inicial podem ser afectadas pela velocidade do vento e turbulência do ar ambiente.

Dos gráficos apresentados anteriormente, é possível verificar que a temperatura exterior tem uma grande influência nas concentrações da nuvem de Fosgénio, embora a classe de estabilidade e a velocidade do vento também têm influenciam. Com isto é possível inferir que os cenários de maior severidade se dão na época de Verão, como os que foram analisados na secção 6.2.

De seguida fez-se a comparação das concentrações máximas para a situação de Verão (pior cenário possível), variando apenas a classe de estabilidade e a velocidade do vento.

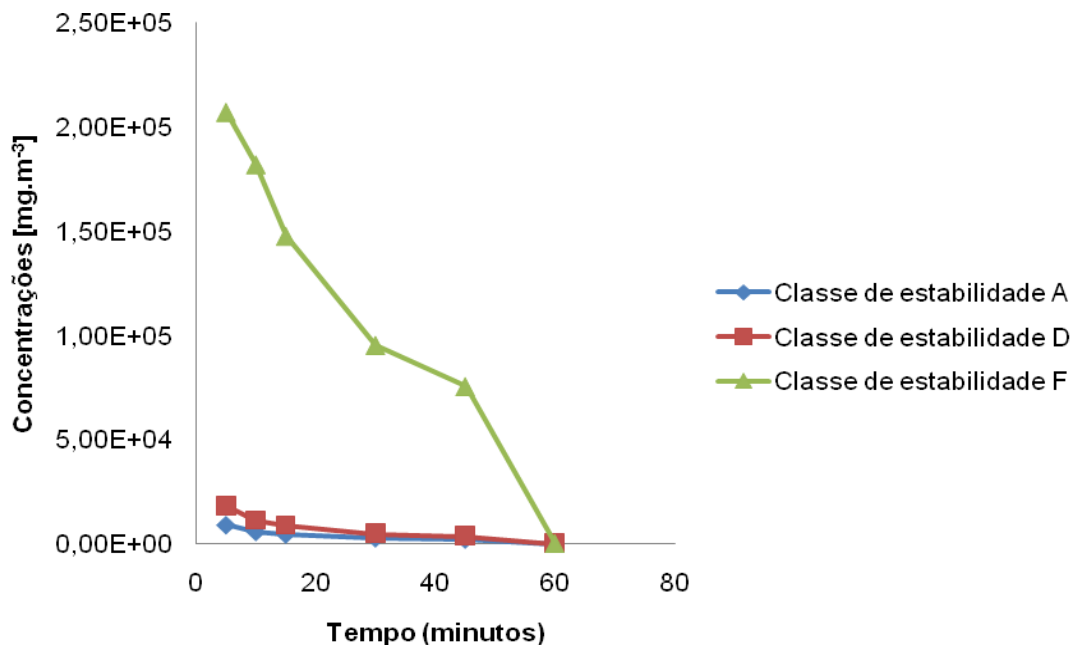


Figura 6.14 Evolução das concentrações para as diferentes classes de estabilidade para o Verão.

Analisando o gráfico presente na figura 6.11, é possível constatar que a classe de estabilidade com concentrações mais altas é a classe F, isto pode dever-se à grande estabilidade atmosférica, e consequente à menor razão de mistura. Embora tal ocorra é de referir que este tipo de classe é normalmente atribuído ao período nocturno o que diminui, à partida, a quantidade de população exposta.

As concentrações máximas calculadas pelo RISCALV para a classe D são bastante diferente das concentrações máximas para a classe F, o que pode ser explicado pela velocidade do vento alta e a influência diluição da nuvem de Fosgénio.

A classe A é a classe em que se verificam as menores concentrações máximas de Fosgénio, mesmo com velocidades do vento mais baixas. Contudo a instabilidade atmosférica tem um papel importante na diluição da nuvem com o ar ambiente.

6.4 Determinação dos índices de risco para as pessoas expostas

Para se poder analisar os índices de risco a que as pessoas estão expostas fez-se um resumo que pode ser consultado na Tabela 6.7 das concentrações a que, as pessoas presentes nos locais fixados como locais críticos, seriam expostas em caso de libertação accidental de Cloro e Fosgénio.

Tabela 6.7 Número de alunos distribuídos por escola no conselho de Estarreja e índices de concentração a que expostos

FREGUESIAS	IDENTIFICAÇÃO MAPA	ESCOLAS	ALUNOS/CLIENTES	DOCENTES, AUXILIARES E OUTROS	NÍVEIS DE CONCENTRAÇÃO			
					5 MINUTOS	10 MINUTOS	30 MINUTOS	30 MINUTOS
BEDUÍDO	E 1	EB2,3 Padre Donaciano de Abreu Freire	653	T 198	0			0
	E 3	Escola 1.º Ciclo Agro	107	8	0		0	0
	E 3	Jardim Infância Agro	20	1	0		0	0
	E1	Escola 1.º Ciclo Paço	109	8	0			0
	E1	Jardim Infância Paço	22	2	0			0
	E2	Escola Secundária de Estarreja	1200	188	0			
CANELAS	E7	Escola 1.º Ciclo Canelas	50	3	0	0		
	E7	Jardim Infância Canelas	19	2	0	0		
FERMELÃ	E9	Escola 1.º Ciclo Terras do Monte	56	5	0	0		0
	E8	Jardim Infância Roxico	9	1	0	0		
	E6	Escola 1.º Ciclo Lacerias	81	6	0	0		
SALREU	E6	Jardim Infância Lacerias	39	3	0	0		
	E4	Escola 1.º Ciclo da Senhora do Monte	59	4	0	0		
	E4	Jardim Infância da Senhora do Monte	21	2	0	0		
	E5	Jardim Infância do Vale do Castanheiro	13	1	0	0	0	
	P1	Recinto de Feira	1000	280	0			0
SUBTOTAL			3458	712	Fosgénio			
TOTAL			4170		Cloro			

Da análise da tabela 6.7 é possível verificar que nos primeiros cinco minutos não estão afectados nenhum dos locais considerados sensíveis, no entanto da observação da Figura 6.4 pode observar-se que algumas habitações seriam atingidas por concentrações muito elevadas.

Passados dez minutos após a libertação, permite constatar que as escolas e o recinto de feiras estariam expostas à nuvem de Fosgénio, sendo que todos estes locais pertencem à freguesia de Beduído, a mais densamente povoada do concelho de Estarreja o que aumenta o risco de exposição entre a população.

Aos trinta minutos após a libertação é onde a nuvem atinge uma maior área, afectando tanto escolas próximas com as situadas a freguesias mais distantes. As concentrações são de facto mais baixas mas continuam a ser preocupantes em termos de risco para a saúde humana e ambiente.

Quanto ao Cloro, pode afirmar-se que afecta menos a população nos locais estabelecidos como sensíveis, no entanto a área da nuvem afectaria uma grande área, alguma dela densamente povoada e ambientalmente sensível.

7 Conclusões e considerações finais

A observação e análise de todas as simulações efectuadas, permite concluir que as condições atmosféricas, nomeadamente a classe de estabilidade e a velocidade do vento influenciam na dispersão da nuvem. A temperatura do ar ambiente também é um factor importantíssimo na dispersão da nuvem de gás, sendo que quanto maior a temperatura, maior evaporação.

Das classes de estabilidade e velocidades do vento analisadas pode verificar-se que a simulação para a classe F é sem dúvida a que permite maiores concentrações, embora a extensão da nuvem seja pequena em relação às outras classes.

As simulações apresentadas para a classe A, permite afirmar que esta é a classe para a qual as concentrações são mais baixas, devido à sua instabilidade promovem a diluição da nuvem de forma mais rápida.

É para as condições atmosféricas fixadas para as simulações feitas para a classe de estabilidade D em que figura o pior cenário possível, isto é, em termos de concentrações é a que possui concentrações máximas entre as obtidas para diferentes classes, mas é também na dispersão que o vento tem um papel importante no transporte nuvem para zonas densamente povoadas e ambientalmente sensíveis. É importante frisar que esta classe de estabilidade é a mais frequente para Estarreja.

A indústria química tem um papel importantíssimo em Portugal dando emprego a mais 22500 trabalhadores, com volume de negócios que representa cerca de 3,6 % do PIB Português e em 2006 (URL 15) representou aproximadamente 10% do total de exportação do País (URL 16), em Estarreja é responsável por aproximadamente 400 postos de trabalho directos (URL 8). Com isto, existe de facto, a necessidade de coesão entre o vertente Económico, Social e Ambiental.

Das simulações efectuadas foi possível concluir que os produtos manipulados/produzidos pelas indústrias do Complexo Químico de Estarreja (CQE) podem ser de facto um potencial perigo para a população e ambiente das freguesias circundantes, uma vez que no caso de ocorrência de uma libertação accidental de um composto tóxico pode afectar uma vasta área com pontos sensíveis como escolas, e áreas densamente povoada e/ou áreas ambientalmente sensíveis. É importante também frisar que este estudo teve como base os parâmetros meteorológicos mais frequentes, no caso do vento NW e classe estabilidade D, o que não invalida uma

análise posterior para outras condições meteorológicas, dada a sua aleatoriedade ao longo do tempo.

A proximidade das populações ao CQE é um facto evidente. A obrigatoriedade das distâncias de segurança entre habitações e estabelecimentos de perigosidade superior tem como base o Decreto de Lei 254/2007 de 12 de Julho. Sendo que a responsabilidade de estabelecer essas distâncias é remetida para as Câmaras Municipais. No caso particular do Fosgénio o NIOSH (*National Institute Occupational Safety and Health*) tem como referência a distância mínima de segurança, em caso de emergência, de 800 metros de raio podendo ser alargado até 7,3 km, quando existem libertações de Fosgénio superiores a 200 litros (URL 14). Do que foi pesquisado até agora não existem quaisquer referências a essas distâncias. Futuramente é premente a limitação de projectos de edificações futuras quer residenciais, quer de serviços nestes locais a norte da freguesia de Beduído, até ao CQE. Caso isto não aconteça vir podem vir a ser severamente afectadas no caso de uma libertação de compostos químicos como Cloro ou Fosgénio.

A necessidade da utilização de ferramentas como o RISCAV é grande, sendo uma ferramenta de apoio à tomada de decisão, no que respeita a elaboração de planos de emergência internos e externos, exigido pelo DL164/2001, por parte das autoridades de segurança como Bombeiros, Protecção Civil, PSP e GNR, bem como indústrias do CQE. Embora este tipo de acidentes seja pouco vulgar acontecer, não se deve descurar a sua importância, visto poderem vir a causar danos severos na saúde humana e no ambiente.

A realização de simulacros em conjunto com a utilização de ferramentas como o RISCAV é sem dúvida a melhor maneira de avaliar o desempenho das autoridades responsáveis pela segurança e planeamento de emergência a este tipo de acidentes dada a quantidade de pessoas expostas e para que a resposta seja cada vez mais rápida e eficaz.

É de salientar que programas como o PACOPAR, visto terem como objectivo a aproximação das populações às empresas do CQE, de forma a ser um veículo de informação eficaz na transmissão desta problemática de acidentes graves e formas individuais de actuação. Para além dos esforços até agora desenvolvidos é necessário disponibilizar mais e melhor informação à população das várias formas de protecção individual em suas casas trabalhos e escolas.

No que concerne à cultura de risco tecnológico e prevenção de acidentes graves em Portugal é pouco notória, sendo esta introduzida essencialmente pelas directivas

Avaliação de riscos para o complexo químico Estarreja.

Seveso I e II, embora muitas empresas multinacionais já possuíssem alguns requisitos antes mesmo de este serem publicados.

Uma das recomendações para trabalhos futuros é a necessidade de averiguar a situação actual da estação de Avanca pois, quer devido às suas características (medições de 10 m, 30 m e 100 m), quer devido à proximidade ao CQE, pode revelar-se de particular importância o seu bom funcionamento na eventualidade de um acidente com libertação de poluentes para a atmosfera.

Bibliografia

AHMAD K., KHARE M., CHAUDHRY K.K. (2005). "Wind tunnel simulation studies on Dispersion at urban street canyons and intersections – a review". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Elsevier Science Publishers 93, PP 697-717.

BORREGO C *ET AL.* (1989). "Estudo do impacto atmosférico de um acidente de libertação incontrolada de Cloro". Amb – QA. (5) /88, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Aveiro.

BORREGO C., COUTINHO MIGUEL S., COSTA MARIA J. (1990). "Introduction of terrain roughness effects into a Gaussian dispersion model", Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam. PP. 153 – 161.

BORREGO, C. (1989): "Acidentes industriais greves e o ambiente"; Curso de riscos industriais e ambiente. Universidade de Aveiro

BOTTELBERGHS P.H., (2000): "Risk analysis and safety policy developments in the Netherlands". Elsevier; Journal of Hazardous Materials 71, 59–84

BRITTER R.E, (1989): "Atmospheric dispersion of dense gases". Annual Review of Fluid Mechanics 21: 317-344, Department of Engineering, University of Cambridge, UK.

CAHEN, B. (2006): "Implementation of new legislative measures on industrial risks prevention and control in urban areas". Journal of Hazardous Materials 130, 293-299.

CERC LTD (2002): GASTAR Version 3, User Manual. Cambridge, UK.

CHANG, J.C. and HANNA, S.R. (2005): "Technical Descriptions and User's Guide for the BOOT Statistical Model Evaluation Software Package, Version 2.0".

DOMINGOS, J.J. DELGADO (1980): "Ocorrência média anual no território português das classes de estabilidade atmosférica de Pasquill-Gifford". "Técnica", Revista de Engenharia, Associação de Estudantes do Instituto Superior Técnico, Lisboa.

ERASE. (2000). "Estratégia de Redução dos Impactes Ambientais Associados aos Resíduos Industriais Depositados no Complexo Químico de Estarreja". Estudo de Impacte ambiental, memória final, Abril de 2000.

BARONTINI F. *et al*, (2008): "Experimental strategies for the identification of substances formed in the loss of control of chemical industrial processes" Journal of Loss Prevention in the Process Industries

HANNA S.R., STRIMAITIS D.G, CHANG J.L. (1991): "Hazard response modeling, uncertainty (A quantitative method)" vol. II. Evaluation of commonly used hazardous gas dispersion models. Sigma Research Corporation e American Petroleum Institute, Washington.

IDAD (2007^a): “Estudo de Impacte Ambiental Projecto de Ampliação do CQE, CUF.”

IDAD (2007^b): “Estudo de Impacte Ambiental Projecto de Ampliação do CQE, DOW.”

KAISER, G. D. e WALKER, B.C. (1978). “Releases of Anhydrous Ammonia From Pressurized containers – the importance of dense-then-air mixtures”, *Atmospheric Environment* 12, 2289-2300.

KHAN F. I., ABBASI, S. A., (2002). “A criterion for developing credible accident scenarios for risk Assessment”. Elsevier; *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 15, 467–475

KHAN F. I., ABBASI, S.A. *et al*;(2001): “Risk analysis of a typical chemical industry using ORA procedure”; Elsevier; *Journal of loss prevention in the Process Industries*; 14, 43-59.

KHAN F. I., ABBASI, S.A., (1999): “Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequences”; Elsevier; *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 12, 361–378

KHAN F. I., ABBASI, S.A. (1998). “Techniques and methodologies for the risk analysis in chemical process industries”; Elsevier; *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 11, 261-277.]

KOOPMAN, R. P., BAKER, J., CEDERWALL, R. T. e GOLDWIRE, H. C. (1982). “Burro Series Data Report LLNL/NWC 1980 Lng Spills Tests”, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California, Ucid-19075- vol 1.

KOOPMAN, R. P., ERMAK, D. L. and CHAN, S. T. (1988). “Review of recent Fields Tests and Mathematical Modeling of Atmospheric Dispersion of Dense Then Air Gases”. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California, Uclrl-99752.

LACOURSIERE P.E. J.P. (2005) : “Bhopal and its effects on the Canadian regulatory framework”. Elsevier; *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 18, 353–359

LEES, F. P.; “Loss Prevention in the Process Industries” (2nd ed.) (3 vols.), pp 2656, Butterworth-Heinmann;1995;

LEITÃO, P., BORREGO, C., MARTINS, J.M. e COUTINHO, M.; «Modelização do impacto atmosférico da nuvem de gás tóxico resultante de um acidente industrial»; Actas das 1as jornadas de Indústria e Ambiente; LNETI; 1989, Lisboa.

LEITÃO, P., BORREGO, C., MARTINS, J.M. e COUTINHO, M.; «Modelo de dispersão de gases pesados para avaliação do impacto atmosférico de um acidente industrial»; Actas da 2ª conferência nacional sobre Qualidade do Ambiente; pp. G145-G154; Universidade Nova de Lisboa;1990; Lisboa.

MARTINS, J.M., CONCEIÇÃO, M., BARROS, N. e BORREGO, C.; «Desenvolvimento de um sistema Integrado para auxílio à tomada de decisão em caso de acidente grave» ; Actas da 5ª conferência Nacional sobre a Qualidade do Ambiente; Universidade de Aveiro; pp. 163-172; Universidade de Aveiro; 1996; Aveiro.

MCBRIDE, M.A., REEVES, A.B., VANDERHEYDEN, M.D., Lea, C.J., and Zhou, X.X. (2001); «Use of advanced techniques to model the dispersion of chlorine on complex terrain»; Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part B, Process Safety and Environment Protection 79; pp. 89-102;.

MICHALIS D. CHRISTOU, AMENDOLA A., SMEDER M (1999). “The control of major accident hazards: The land-use planning issue”. Elsevier. Journal of Hazardous Materials 65, 151–178

NIELSEN, M. (1998): “Dense gas dispersion on the atmosphere”; Risø National Laboratory; Risoe-R-1030(EN). Denmark

PALAZZI, E., De FAVERI, M., FUMAROLA, G. and FERRAILOLO, G.; «Diffusion from a steady source of short duration»; Atmospheric Environment 16; pp. 2785-2790; 1982.

PICKNETT, R.G.; «Dispersion of dense Gas Puffs released in the atmosphere at ground level»; Atmospheric Environment 15; pp. 509-525; 1981.

PPRT. (2005). Plan De Prévention Des Risques Technologiques – Guide Méthodologique. Ministère de l'Écologie, du Développement Durable; Ministère des Transports, de l'Équipement, du Tourisme et de la Mer.

TAVARES, R., SANTOS, P., COSTA, A. M., AMORIM, J.H., MIRANDA, A.I. and BOREGO, C. (2008) “Modelling system for accidental release off atmospheric contaminants in a sea port”, Proceedings of the 2nd International Conference on Harbours Air Quality & Climate Changes 29-30 May 2008, Rotterdam, Holland

RASMUNSSSEN K.: “Natural events and accidents with hazardous materials” Elsevier; Journal of Hazardous Materials; 40 (1995) 43 – 54

RIGAS, F. and SKLAVOUNOS, S.; «Major hazard analysis for populations adjacent to chemical storage facilities»; Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part B; Process Safety and Environment Protection 82; pp. 1-11; 2004.

RMP-EPA. (1999). Risk Management Program Guidance for Offsite Consequence Analysis. United States Environmental Protection Agency, EPA 550-B-99-009, April 1999. www.epa.gov/ceppo/

RMP-EPA. (2004). General Guidance for Risk Management Programs. United States Environmental Protection Agency, EPA 550-B-04-001, April 2004. www.epa.gov/emergencies/

CONTINI S., (1995). “A new hybrid method for fault tree analysis”. Reliability Engineering and System Safe 49, 13-21

SALVI O., DEBRAY B., (2006): “A global view on ARAMIS, a risk assessment methodology for industries in the framework of the SEVESO II directive” Elsevier; Journal of Hazardous Materials 130 187–199

SALVI, O., MERAD, M. e RODRIGUES, N. (2005): "Toward an integrative approach of the industrial risk management process in France". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 18 414-422.

SKLAVONOUS, S. and RIGAS, F.; "Simulation of Coyote physic trials- Part I"; CFD estimation of non-isothermal LNG releases and comparison with box-model predictions; *Chemical Engineering Science* 61; pp. 1434-1443; 2006.

TNO; "Effects V12: for the determination of physical effects from the release of hazardous materials"; 1987.

TNO; "Methods for the determination of physical effects from releases of hazardous materials (Yellow Book)"; first edition; Committee for the prevention of disasters; Directorate-General of Labour; Ministry of Social Affairs and Employment; 1989; Holland.

TNO; "Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from releases of hazardous materials (Green Book)"; Committee for the prevention of disasters; Directorate-General of Labour; Ministry of Social Affairs and Employment; 1992; Holland.

TNO; "Methods for the determination of physical effects from releases of hazardous materials (Yellow Book)"; first edition; Committee for the prevention of disasters; Directorate-General of Labour; Ministry of Social Affairs and Employment; 1997; Holland.

TNO; "Methods for the determination of physical effects from releases of hazardous materials (Yellow Book)" Third Edition Second Revised Print, Committee for the prevention of disasters; Directorate -General of Labour; Ministry of Social Affairs and Employment; 2005; Holland

TURNER, D.B.; "Workbook of atmospheric dispersion estimates"; AP-26; US Environmental Protection Agency; Research Triangle Park; 1969; NC.

COZZANI V. *et al*: "Application of land-use planning criteria for the control of major accident hazards: A case-study" Elsevier; *Journal of Hazardous Materials* A136 (2006) 170–180

ZEREFOS, C.S., ZIOMAS, I.C. and BAIS, A.F.; "Heavy Gas dispersion and Demonstration of Computerized Predictive Tools"; ISPRA COURSES "Major Hazard Analysis"; Thessaloniki; pp. 10-14; 1988.

Sites de internet consultados:

- URL 1 www.acusafe.com
- URL 2 <http://www.hse.gov.uk>
- URL 3 www.cetesb.sp.gov.br
- URL 4 www.greenpeace.org
- URL 5 www.uneptie.org
- URL 6 www.erris.org
- URL 7 www.amria.pt/securria
- URL 8 www.pacopar.org
- URL 9 www.cm-estarreja.pt
- URL 10 <http://sig.ine.pt>
- URL 11 www.aloha.airliquide.com
- URL 12 www.inchem.org
- URL 13 <http://msds.chem.ox.ac.uk>
- URL 14 www.cdc.pt
- URL 15 www.investirinportugal.pt
- URL 16 <http://gee.min-economia.pt>